

António José de Sousa Pereira

2º Ciclo de Estudos em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do
Território

Contributos do *Airborne Laser Scanning* na geração de Modelos Digitais de Elevação e
produtos derivados: Ensaio comparativo baseado em questões geomorfológicas e
hidrográficas

2012

Orientador: Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes

Coorientador: Professor Doutor Augusto Pérez Alberti

Classificação: Ciclo de estudos:

Dissertação de Mestrado

AGRADECIMENTOS

O trabalho aqui apresentado é o resultado de um longo e laborioso percurso, para o qual contribuíram de formas diferentes diversos intervenientes, pelo que se impõe um agradecimento aos mesmos.

Dedico as primeiras palavras para apresentar um profundo agradecimento ao Professor Doutor António Alberto Gomes, referência de atuação profissional há muitos anos e que mais uma vez se mostrou inexcelável. Como orientador esteve sempre presente, com um empenho e disponibilidade extraordinário, sempre com palavras de motivação e estímulo, dando sugestões acertadas nos momentos certos. A ele os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Doutor Augusto Pérez Alberti, coorientador desta dissertação, pela preciosa colaboração na obtenção dos dados utilizados, pelo acompanhamento e orientação no trabalho no campo, assim como pelos sábios conhecimentos que me transmitiu acerca da área de estudo.

Ao Manuel Borobio Sanchis, Diretor do *Instituto do Territorio - Conselleria do Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras da Xunta de Galicia*, pela cedência de parte dos dados utilizados e sem os quais não seria possível efetuar o trabalho.

Ao Pedro Gonçalves, companheiro de “aventura” académica dos dois últimos anos, que teve sempre palavras de incentivo e se demonstrou disponível para me auxiliar em todas as dificuldades que atravessassei.

À Inês Marafuz, pelo precioso auxílio no manuseamento do HEC-RAS e procedimentos de definição dos perímetros de cheia.

Aos meus amigos, especialmente ao Luís, à Eugénia, à Maria e ao Pedro, pelas suas palavras de incentivo, preciosas sugestões e crença nas minhas capacidades.

À Margarida Ferreira, pelo precioso auxílio na revisão do *Abstract*.

À minha família, especialmente aos meus pais e à minha tia Manuela, que sempre me incentivaram e proporcionaram todas as oportunidades de que necessitei.

Por fim, à Mónica, por todo o suporte que me proporcionou, por todas as trocas de ideias e também por todos os momentos de privação que lhe impus ao longo destes dois últimos anos. Sem ela não teria conseguido alcançar os meus objetivos. A ela dedico esta dissertação.

RESUMO

O presente trabalho subordina-se tematicamente à utilização dos dados provenientes do *Airborne Laser Scanning* (ALS) na geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), produtos derivados e do possível contributo destes na análise de diferentes questões.

O ALS apresentou um rápido e positivo desenvolvimento desde que surgiu em meados da década de 90 do século XX e são diversas as referências às suas vantagens na literatura de referência, vantagens estas que tornaram esta tecnologia incontornável, nos nossos dias, na aquisição de dados altimétricos de base.

Apesar das diversas vantagens comparativas apontadas, são ainda poucas as referências à utilização deste tipo de dados em Portugal. Este facto proporciona abertura para o desenvolvimento de trabalhos que permitam inferir sobre as vantagens da sua utilização, no âmbito dos problemas abordados em Geografia e no ordenamento do território.

Neste sentido, as ideias aqui apresentadas procuram responder a dois pontos essenciais relativos ao estado da arte da tecnologia no país. Em primeiro lugar, a constituição de um corpo teórico de referência, que facilite o desenvolvimento de futuras pesquisas e aplicações neste domínio e, em segundo lugar, a verificação da validade e impacte dos dados obtidos pelo ALS em estudos geomorfológicos, recorrendo a exemplos específicos.

Desta forma, o trabalho desenvolve-se conceptualmente em três partes principais. Na primeira, procura responder-se ao primeiro ponto, mediante uma reflexão teórica, onde é exposto um conjunto de conhecimentos alicerçados na literatura de referência, seguindo uma abordagem metodológica de exposição de ideias que parte do todo, a Detecção Remota, para o particular, o ALS.

Na segunda parte, procura, na prática, dar-se resposta ao segundo ponto, através de uma análise comparativa entre produtos derivados dos MDE, não só produzidos a partir dos dados do ALS, mas também de outras fontes de dados altimétricos de grande escala (1/5000 e 1/25000), mais tradicionais. Para tal, efetua-se uma análise das diferenças altimétricas e morfológicas patentes entre os MDE, mas também de questões relacionadas com a hidrografia e cálculos hidráulicos, neste último caso, através da modelação de perímetros de cheia. A concretização desta segunda parte do trabalho efetuou-se numa pequena área de 34,8 Km², na Galiza, em Espanha.

A terceira parte procura ser o culminar das anteriores, colocando em evidência as principais diferenças verificadas, mas procurando também salientar vantagens/ desvantagens e definindo algumas oportunidades para o emprego dos dados ALS.

Em termos metodológicos, foram utilizados quatro tipos de dados altimétricos de base, produzidos cinco MDE iniciais e diversos produtos a partir destes, utilizando para tal diferentes *softwares* e procedimentos. A análise dos produtos foi complementada com o trabalho no campo, quer com o levantamento de dados com o recurso ao GPS, quer com a procura de evidências relacionadas com as diferenças reveladas na análise comparativa.

Verificou-se uma maior capacidade de apreensão das diferenças ao nível da morfologia, por parte dos modelos elaborados a partir dos dados do ALS e que esta capacidade culmina em resultados significativamente diferentes nos aspetos abordados. Perante isto, considera-se que o trabalho proporciona um contributo importante para a validação do uso dos dados ALS na representação e interpretação da morfologia e da hidrografia, assim como se demonstra a importância que estes dados de base podem assumir na modelação de perímetros de inundação.

Assim, pensa-se que o ALS poderá trazer para diversas ciências e campos de investigação com preocupações sobre a superfície terrestre, alterações significativas na maneira de analisar os fenómenos, com especial destaque para os que se relacionam com a temática geomorfológica.

Palavras-chave: ALS, Altimetria, Hidrografia, LiDAR, MDE, Morfologia, Perímetros de cheia.

ABSTRACT

The current study theme is the using of data from the Airborne Laser Scanning (ALS) in the Digital Elevation Models (DEM) generation, its associated products and their possible contribution in the analysis of different questions.

The ALS has shown a rapid/fast and positive development since its appearance in the middle 1990s. References to its advantages are diverse in reference literature making it nowadays an inescapable technology in the acquisition of base altimetric data.

Despite its various comparative advantages, there are still few references to the use of this type of data in Portugal. This leaves space for the development of studies which allow to infer on the advantages of this data usage with problems dealt with in Geography and land management.

Thus, the ideas presented in this study try to answer two essential points related to state of the art technology in the country. In the first place, the building of a reference theoretical body that will help forward the development of future research and usage in this area. In the second place, the verification of validity and impact of data obtained by the ALS in geomorphologic studies, using specific examples.

The study is developed, as far as concept is concerned, in three main parts. In the first one, the aim is to respond to the first point using a theoretical reflection. In it, a knowledge set based on reference literature is exposed, following a methodological approach of revealing ideas that goes from the whole, remote detection, to the part, the ALS.

In the second part the study attempts to answer the second point using a comparative analysis between products derived from DEM, not only acquired from ALS data but also from other great scale altimetric data sources (1/5000 e 1/25000), which are more traditional. To accomplish that, an analysis of altimetric and morphologic differences perceivable between the DEM is made, as well as of questions related to hydrography and hydraulic calculations, this last example being reached through the modeling of flood perimeters. The completion of the second part of this study was done in a small area of 34,8 Km² in Galicia, Spain.

The third and last part aims to culminate the former ones, highlighting the main differences observed, but it is also trying to emphasize advantages/disadvantages and defining some opportunities for ALS data usage.

In what concerns methodology, four types of base altimetric data were used, five initial DEM were produced and several other products starting from these, using for such a task different softwares and procedures. Product analysis was complemented with field work, with the gathering of data using GPS as well as the search for evidence related to the differences revealed in the comparative analysis.

It was observed a bigger ability to apprehend the differences at the morphology level using the models created from ALS data and that this ability culminates in results significantly different in the studied aspects. Therefore, it is considered that the study provides an important contribution to the validation of ALS usage in the representation and interpretation of morphology and hydrography, as well as it is demonstrated the importance these base data can assume in the modeling of flood perimeters.

Thus, there is the conviction that ALS can bring significant alterations in the way phenomena are analyzed by various sciences and investigation fields, with special emphasis to the ones related with the geomorphologic theme.

Keywords: ALS, altimetry, hydrography, LiDAR, DEM, morphology, flood prone areas, Land management.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABELAS	5
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Enquadramento geral e objetivos	7
1.2. Estrutura do trabalho	9
2. DETEÇÃO REMOTA	11
2.1. Breve reflexão histórica sobre o desenvolvimento da deteção remota.....	11
2.2. A radiação eletromagnética e os sensores	14
3. LIGHT DETECTION AND RANGING (LiDAR)	19
3.1. LiDAR: uma definição	19
3.2. Do passado ao presente do LiDAR - breves apontamentos históricos	23
3.3. Airborne Laser Scanning (ALS).....	27
3.3.1. Princípios de funcionamento do ALS	27
3.3.1.1. A aquisição de dados	28
3.3.1.2. O pós-processamento	42
3.3.2. Os ficheiros LAS e as nuvens de pontos	43
3.3.3. Aplicações do ALS	50
3.3.4. O ALS em Portugal	52
3.3.5. Vantagens e desvantagens do ALS	53
4. ENSAIO COMPARATIVO	59
4.1. A área de estudo: caracterização geral	59
4.2. Os dados de base	63
4.3. Metodologia do ensaio	68
4.4. Resultados do ensaio comparativo	80
4.4.1. Os Modelos Digitais de Elevação e os produtos derivados	80
4.4.2. A hidrografia.....	98
4.4.3. Modelação hidráulica – definição de perímetros de cheia	113
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS - CONCLUSÕES	118
6. BIBLIOGRAFIA	123
7. ANEXOS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1- Esquema conceptual da dissertação.....	9
Figura 2- Breve cronologia da detecção remota.	12
Figura 3- Componentes da radiação eletromagnética (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001).	15
Figura 4- Propriedades da energia eletromagnética. a) Comprimento de onda e amplitude; b) Frequência; c) Fase. (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001).	15
Figura 5- Principais divisões do espectro eletromagnético	16
Figura 6- Plataformas, sensores e formas de detecção remota.....	17
Figura 7- Designações do LiDAR segundo a plataforma e o objeto mensurado.....	22
Figura 8- Breve cronologia do LiDAR	23
Figura 9- Etapas do ALS.....	27
Figura 10- Tipos de plataformas aéreas utilizadas na recolha de dados ALS.	28
Figura 11- Instrumentos a bordo da plataforma aérea do ALS	29
Figura 12- Diagrama esquemático de um laser simples (Adaptado de Campbell e Wynne, 2011)	30
Figura 13- Comprimentos de onda mais utilizados em ALS	31
Figura 14- Funcionamento básico do sensor laser. (Alterado de Wehr e Lohr, 1999).....	31
Figura 15- Medição da distância utilizando um laser de sinal contínuo (CW). (Alterado de Wehr e Lohr, 1999)	32
Figura 16- Características das unidades de deflexão / mecanismos de varrimento. (Adaptado de Wehr e Lohr, 1999 e Wehr, 2008).....	33
Figura 17- Comportamento dinâmico de um avião.....	34
Figura 18- Processo de aquisição de dados do ALS	36
Figura 19- Características da pegada.	38
Figura 20- Faixa de varrimento na direção perpendicular à direção de voo.	39
Figura 21- Retornos múltiplos obtidos a partir do ALS.....	40
Figura 22- Retornos múltiplos numa contrução humana (muro)	41
Figura 23- Funcionamento dos retornos numa área com vegetação. (Adaptado de Harding, 2008).....	41
Figura 24- Passos do processo de pós-processamento dos dados ALS.....	42
Figura 25- Exemplo de cabeçalho de um ficheiro LAS.....	45
Figura 26- Exemplo de um ficheiro LAS.....	46
Figura 27- Imagem monocromática obtida a partir do valor de intensidade do levantamento por ALS utilizado (a) e respetivo ortofotomapa da área (b).....	48
Figura 28- Exemplo de dados LAS da área de estudo utilizados.	50
Figura 29- Localização da área de estudo.....	59
Figura 30- Características gerais da área de estudo com base na BTN à escala 1:25000: Hipsometria (a); Declives (b); e Exposição das vertentes (c).	60
Figura 31- Gráfico Termopluiométrico da estação meteorológica de Pontevedra (1971-2000).	61
Figura 32- Bacia hidrográfica do rio de Mougás.	62
Figura 33- Ficheiros de pontos ALS utilizados e área de abrangência do levantamento.....	63
Figura 34- Extrato da nuvem de pontos ALS representados por altitude (m).	65
Figura 35- Extrato do Ortofotomapa.....	66
Figura 36- Modelo Digital de Elevação 5x5 metros, folhas n.º 260 e n.º 261.....	66
Figura 37- Limite das folhas da Base Topográfica da Galiza à escala 1:5000 e BTN à escala 1:25000 utilizadas	66
Figura 38- Abordagem metodológica	68
Figura 39- Processo de verificação/correção utilizando o software LP360 (representação dos pontos por classificação).....	69
Figura 40- Extrato da área de estudo: a) ortofotomapa: b) Distância euclidiana entre os pontos derivados do ALS, por classe.	72

Figura 41- Conclusão do processo de exportação do dados para o formato nativo do ArcGIS® a partir do <i>software</i> GPS Pathfinder™	75
Figura 42- Procedimentos desenvolvidos com a caixa de ferramentas <i>Arc Hydro Tools</i> , com vista à obtenção dos dados sobre a hidrografia da área de estudo.	77
Figura 43- Processo de determinação dos perímetros de cheia e altura da coluna de água	79
Figura 44- Gráficos de correlação entre os MDE.	81
Figura 45- Ortofotomapa e sombreados de relevo obtidos a partir dos diferentes MDE, elaborados para um setor da área de estudo.	84
Figura 46- Perfil topográfico junto à foz do rio Mougás, localização e fotografia (perspetiva de este)	85
Figura 47- Carta de declives baseada no MDE ALS 2x2	86
Figura 48- Ortofotomapa e declives obtidos a partir dos diferentes MDE, elaborados para um setor da área de estudo.	87
Figura 49- Ortofotomapa e Exposições de vertentes obtidas a partir dos diferentes MDE, elaborados para um setor da área de estudo.	89
Figura 50- Localização do Setor A e pormenor dessa área no ortofotomapa.	90
Figura 51- Sombreados de relevo do setor A.....	91
Figura 52- Perspetiva 2,5D dos sombreados de relevo e fotografia do setor A (Perspetiva de ONO).	92
Figura 53- Declives do setor A.	93
Figura 54- Perfil topográfico 1 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)	94
Figura 55- Perfil topográfico 2 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)	95
Figura 56- Perfil topográfico 3 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)	95
Figura 57- Perfil topográfico 4 (A); diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B); Pormenor do perfil topográfico 4 (C); e fotografia de parte do perfil topográfico 4 (D)	95
Figura 58- Esquema interpretativo da morfologia do terreno ao longo do perfil n.º 4.	97
Figura 59- Exemplo de uma área de acumulação de sedimentos ao longo do perfil n.º 4	97
Figura 60- Redes e bacias hidrográficas obtidas a partir dos diferentes MDE	99
Figura 61- Perfis longitudinais do rio de Mougás obtidos a partir dos diferentes MDE	102
Figura 62- Pormenores do traçado do rio de Mougás junto à nascente	103
Figura 63- Traçado da rede hidrográfica a partir dos MDE com a resolução de 5 metros para o setor A.	104
Figura 64- Perfis longitudinais do rio de Mougás, obtidos a partir dos MDE com a resolução de 5 metros e tendo com referência de traçado, a rede hidrográfica na BTN à escala 1:25000	106
Figura 65- Diferenças de altitude dos perfis longitudinais do rio de Mougás, obtidos a partir dos MDE com a resolução de 5 metros e tendo com referência de traçado, a rede hidrográfica na BTN à escala 1:25000	106
Figura 66- Perfis topográficos 5, 6 e 7 medidos ao longo do rio de Mougás	107
Figura 67- Curva hipsométrica do rio de Mougás para os diferentes MDE gerados	108
Figura 68- Diferenças entre as curvas hipsométricas do MDE de referência (MDE ALS 5x5) e os restantes	108
Figura 69- Bacias e redes hidrográficas (classificadas segundo <i>Strahler</i>) elaboradas a partir dos diferentes MDE.	111
Figura 70- Perímetros de cheia definidos para o rio de Mougás a partir dos diferentes MDE com a resolução de 5 metros.	114
Figura 71- Perímetros de cheia para um período de retorno de 100 anos, definidos para o rio de Mougás a partir dos diferentes MDE com a resolução de 5 metros.	115
Figura 72- Perfis topográficos junto à foz do rio de Mougás e altitude da água para situações de cheia com períodos de retornos de 10, 50 e 100 anos	116

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1- Principais divisões do espectro eletromagnético e respetivos limites. (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001).....	16
Tabela 2- Plataformas, sensores utilizados na deteção remota. Conceitos e designações usadas por Rees (2001), Konecny (2003), Mather (2004), Elachi e Van Zyl (2006), Borengasser <i>et al.</i> (2007), Liu e Mason (2009); Maini e Agrawal (2011).	18
Tabela 3- Designações utilizadas na bibliografia de referência para nomear a tecnologia LiDAR	20
Tabela 4- Exemplo de registos de medição da distância e dados associados a partir do ALS - ângulos em radianos e distâncias em metros (Adaptado de Devereux e Amable, 2009)	33
Tabela 5- Exemplo de registos da posição e do comportamento dinâmico do GPS e IMU a partir do ALS - ângulos em radianos e distâncias em metros (Adaptado de Devereux e Amable, 2009)	35
Tabela 6- Atributos dos ficheiros LAS e formatos de gravação.....	46
Tabela 7- Classes de classificação do ALS para todos os formatos, na versão 1.4	49
Tabela 8- Principais aplicações do ALS.....	51
Tabela 9- Vantagens do ALS	54
Tabela 10- Desvantagens do ALS	56
Tabela 11- Comparação entre vários métodos de aquisição de dados utilizados na geração de MDE (Alterado de Li <i>et al.</i> 2004).....	57
Tabela 12- Características gerais dos pontos derivados do levantamento por ALS.	64
Tabela 13- Características gerais dos pontos derivados do levantamento por ALS, por classe	65
Tabela 14- Síntese das características dos dados de base utilizados	67
Tabela 15- Características da nuvem de pontos do ALS correspondente à área de ensaio, após processamento dos dados iniciais.	70
Tabela 16- Características da nuvem de pontos do ALS correspondente à área de ensaio, com a classificação 2 <i>Ground</i>	70
Tabela 17- Distância euclidiana (m) entre os pontos do ALS, por classe e %	72
Tabela 18- Características gerais das curvas de nível e pontos cotados da informação derivada da BTG à escala 1:5000.....	73
Tabela 19- Características gerais das curvas de nível e pontos cotados da informação derivada da BTN à escala 1:25000.....	73
Tabela 20- Fontes de informação dos MDE gerados e respetiva resolução.	74
Tabela 21- Resultados finais das medições efetuadas por GPS, após o processo de correção diferencial	76
Tabela 22- Parâmetros utilizados na caracterização inicial da hidrografia criada para a área de estudo.....	78
Tabela 23- Valores de Manning utilizados em relação à rugosidade do solo.....	79
Tabela 24- Período de retorno e respetivos caudais de cheia calculados para a rio de Mougás.	79
Tabela 25- EMQ calculado entre as medições obtidas no levantamento por GPS e os valores interpolados a partir dos diferentes MDE para as mesmas localizações	80
Tabela 26- Diferenças de altitude e EMQ entre o MDE de referência (MDE ALS 5x5) e os restantes MDE	81
Tabela 27- Comparação entre os valores de altitude e declives para os diferentes MDE	82
Tabela 28- Declives (°) por classe e MDE	86
Tabela 29- Distribuição das exposições obtidas a partir dos MDE por quadrantes.....	88
Tabela 30- Distribuição das exposições obtidas a partir dos MDE por octantes.....	88
Tabela 31- Características gerais da geração automática das redes e bacias hidrográficas para a área de estudo	100
Tabela 32- Parâmetros utilizados na análise hipsométrica da bacia hidrográfica do rio de Mougás.....	101
Tabela 33- Comparação dos traçados das redes hidrográficas geradas automaticamente a partir dos MDE e as redes hidrográficas representadas na cartografia oficial à escala 1:5000 e 1:25000	105
Tabela 34- EMQ entre as curvas hipsométricas dos MDE e a curva hipsométrica do MDE de referência.....	109
Tabela 35- Parâmetros utilizados na análise linear das redes hidrográficas do rio de Mougás	109

Tabela 36- Classificação da rede hidrográfica do rio de Mougás por ordem, segundo a classificação de <i>Strahler</i> , e relação de bifurcação.	110
Tabela 37- Parâmetros utilizados na análise areal da bacia hidrográfica do rio de Mougás	112
Tabela 38- Área ocupada pela água em situações de cheias, para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, para cada um dos MDE e diferença (%) em relação ao MDE ALS 5x5	115
Tabela 39- Designações utilizadas na bibliografia de referência para nomear a tecnologia LiDAR e autores que as utilizam	137
Tabela 40- Atributos dos ficheiros LAS e formatos de gravação	138
Tabela 41- Parâmetros utilizados na caracterização da hidrografia	140

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral e objetivos

LiDAR (*Light Detection and Ranging*), LaDAR (*Laser Detection and Ranging*) e *Laser Scanning*, são designações utilizadas para falar de um conjunto de tecnologias que têm revolucionado a forma de recolher dados sobre a superfície terrestre na última década e, como tal, alterado a forma de o investigador olhar para os objetos e elementos que o rodeiam.

Na sequência de diversos desenvolvimentos tecnológicos, o LiDAR e mais especificamente, o *Airborne Laser Scanning* (ALS), apresentou um desenvolvimento rápido e bem-sucedido (Ackermann, 1999). Na última década, deixou de ser apenas usado por especialistas e tornou-se objeto de grande difusão por vários tipos de utilizadores, dando origem a inúmeras aplicações (Large et al., 2009). Segundo Lemmens (2011), a técnica afirma-se mesmo, na atualidade, como uma técnica padrão na aquisição de dados e geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Esta técnica faculta grandes oportunidades no desenvolvimento da investigação. Segundo Large et al. (2009), as oportunidades que se abrem, abrangem dimensões espaciais e intervalos temporais anteriormente inatingíveis (e nalguns casos inimagináveis), podendo estar-se perante uma revolução na compreensão e apreensão de dados sobre a Terra.

O carácter inovador e, alegadamente, revolucionário da técnica, a sua forte e rápida expansão, a quantidade e o detalhe apresentado pela informação derivada, são, por si só, motivos suficientes para a explorar. Mas deveremos ter, também, em consideração, o facto de esta se revelar parcamente explorada e utilizada em Portugal, o que se reflete na ainda relativamente reduzida literatura de referência sobre o assunto, destacando-se as publicações de Gonçalves (2005), Pereira (2005) e Rodrigues et al. (2005), Gonçalves (2006), Gonçalves-Seco et al. (2006), Gonçalves e Gonçalves-Seco (2007), Neves e Gonçalves (2007), Ferraz et al. (2009), Pereira et al. (2009a; b), Gonçalves e Pereira (2010a; b), Pereira e Gonçalves (2010), Sarmento (2010), Gomes (2011), Gonçalves e Jalobeanu (2011), Gonçalves-Seco et al. (2011), Jalobeanu e Gonçalves (2011), Gonçalves e Pereira (2012), Brito et al. (2012), Ferraz et al. (2012), e Jalobeanu e Gonçalves (2012), que abordam o assunto em diferentes perspetivas.

Dada a falta de referências generalistas e sistematizadas no que concerne ao LiDAR e ao ALS em Portugal, pretende-se, como ponto de partida, que este trabalho possa servir como documento sintetizador e facilitador de um conjunto de informação de base sobre o ALS, constituindo-se como mais um contributo para o desenvolvimento da aplicação desta técnica na investigação Geográfica.

Assim, o presente trabalho, de carácter eminentemente metodológico, pretende atingir objetivos que importa referir. Desde logo, e na sequência do anteriormente referido, pretende-se apresentar as principais características do LiDAR, mais especificamente do ALS, demonstrando simultaneamente as suas potencialidades.

Tal caminho não pode ser alcançado sem a compreensão da origem e processamento dos dados derivados do ALS. Por isso, procurou-se conhecer as metodologias de processamento dos dados e explorar algumas das suas potencialidades, nomeadamente no que concerne à produção de Modelos Digitais de Elevação e informações derivadas.

Presume-se à partida que um grande rigor na precisão vertical e horizontal, e uma malha densa de medições sobre a superfície terrestre, como é fornecida pelo ALS, serão condições suficientes para que a modelação do terreno seja mais exata, presunção que, contudo, ainda padece de comparação e aferição das vantagens e desvantagens relativamente a utilização de outras fontes de dados.

Assim, o principal objetivo que motivou o subsequente desenvolvimento do trabalho foi a aferição das diferenças entre os MDE produzidos com os dados do ALS e os elaborados a partir de outras fontes de dados mais utilizadas.

A este respeito, será de considerar que os MDE são extremamente importantes como informação de base para a modelação de diferentes assuntos e geração de diferentes produtos, pelo que uma melhor informação deste tipo terá tendência para a geração de melhor produtos finais, que levarão a melhores decisões em diferentes âmbitos, especialmente no processo de planeamento e ordenamento do território.

Para tal, definiram-se objetivos mais específicos que procuraram aferir alguma das principais diferenças possíveis de encontrar.

O primeiro destes objetivos foi, como não poderia deixar de ser, a aferição das diferenças da altimetria e morfologia do terreno dos MDE derivados do ALS, em relação aos originados através de outras fontes, avaliando a possibilidade de o ALS se constituir como uma mais-valia.

Além disso, e porque importa aferir também outras diferenças, procurou-se, igualmente, compreender o impacto dos MDE derivados do ALS, face aos obtidos a partir de outros dados no estudo das questões hidrológicas, através de comparação de redes e bacias hidrográficas geradas automaticamente a partir destes, assim como de parâmetros derivados.

O objetivo é avaliar a capacidade de cada um dos modelos por si só, de contribuir para o estudo da hidrografia e de aspetos relacionados. Sendo assim, além da comparação de produtos derivados dos diferentes modelos, alguns elementos, como as questões do traçado, serão comparadas com o que se encontra representado na cartografia oficial à escala 1:5000 e 1:25000.

Como culminar da comparação das diferenças existentes entre as diversas fontes de dados, procurou-se compreender as mesmas diferenças em termos de modelação hidráulica de

parte do rio principal da área de estudo, utilizando os dados anteriormente referidos, verificando das diferenças existentes na delimitação de perímetros de cheia, para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

A opção pela exploração da comparação dos diferentes MDE com base em parâmetros hidrológicos pareceu-nos pertinente, já que o estudo dos fenómenos hidrológicos se apresentam, na atualidade, com um corpo sólido de conhecimentos amplamente divulgados e, simultaneamente, se afiguram como uma área de importância no processo de mitigação das perigosidades associadas aos mesmos, sendo parte constituinte de diversos tipos de planos no âmbito do processo de planeamento e ordenamento do território.

1.2. Estrutura do trabalho

O trabalho aqui apresentado encontra-se desenvolvido em quatro capítulos que organizam as três partes nucleares em que este se centra (Figura 1).

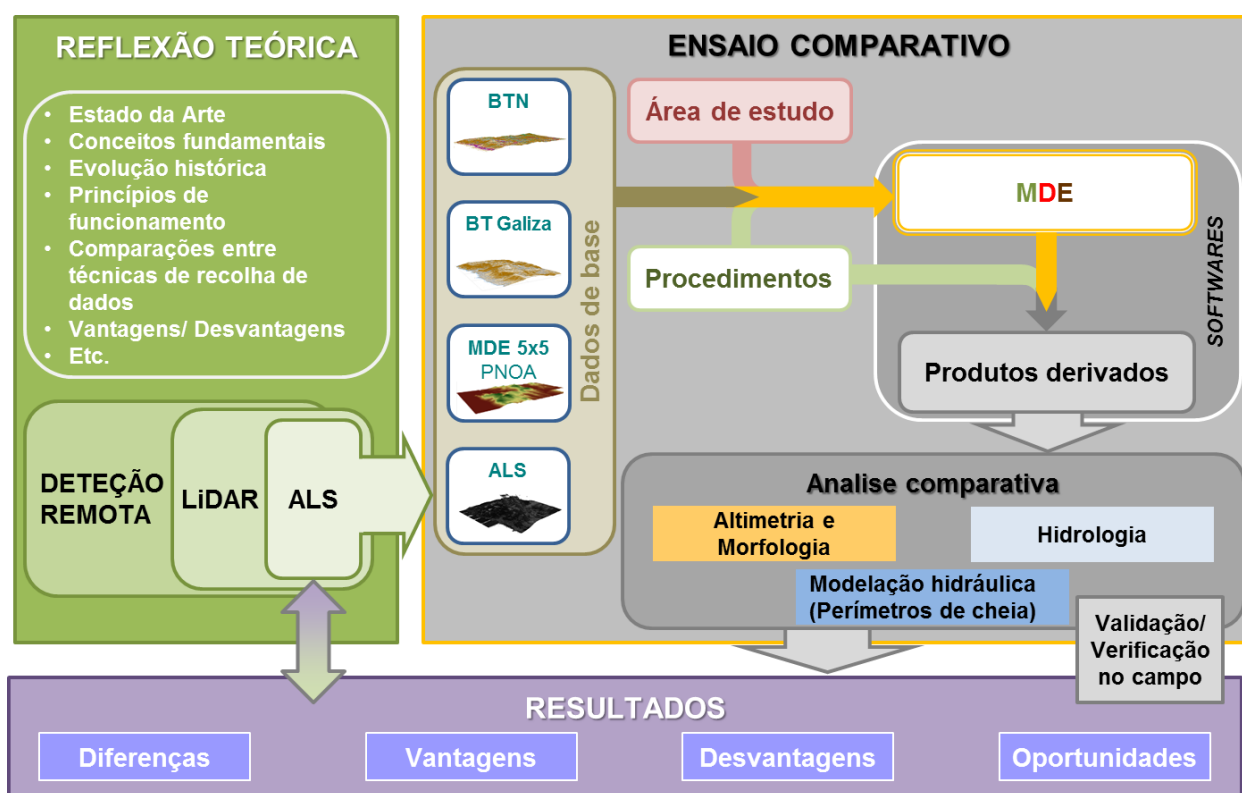


Figura 1- Esquema conceptual da dissertação

A primeira parte apresenta uma reflexão teórica prévia, onde se expõe um conjunto de conhecimentos que procuram proporcionar condições para uma correta compreensão do funcionamento do ALS. A abordagem é feita do todo, a deteção remota, para o particular, o ALS, desenvolvendo um fio condutor, cujos conteúdos se vão densificando à medida que se

particularizam. Neste domínio, são abordados conceitos de base, princípios de funcionamento, efetuadas retrospectivas históricas, comparações, abordados os dados derivados, etc., aspetos que são apresentados numa lógica sequencial, em que uns se tornam pré-requisitos para uma correta apropriação das ideias seguintes.

A segunda parte retrata as operações e análises efetuadas sobre os dados utilizados, cujas características são inicialmente apresentadas, assim como a área de estudo e as opções metodológicas assumidas. Na sequência, são apresentados e analisados de forma comparativa os resultados dos procedimentos, não especificamente os cinco MDE elaborados, mas os variados produtos derivados destes, que foram elaborados com o auxílio de um diversificado conjunto de *softwares*. Procura-se assim a identificação das diferenças, quer através de uma abordagem geral, quer particularizando determinados setores da área de estudo que proporcionam uma melhor leitura das questões em análise, procurando, simultaneamente, enunciar as razões das mesmas – fase que procurou consolidar-se em alguns aspetos com a validação/ verificação do trabalho no campo.

A perspetiva comparativa, na sequência dos objetivos enunciados, apresenta-se decomposta em três subpartes, a primeira, relacionada com a comparação altimétrica e morfológica dos MDE; a segunda, associada à comparação das redes hidrográficas, bacias hidrográficas e parâmetros derivados; e a terceira, onde se apresentam os resultados da modelação hidráulica e a geração de perímetros de cheia para parte do rio principal da área de estudo.

Ao longo desta parte, foram utilizadas não só um conjunto muito diversificados de produtos para a análise, mas também diversas técnicas, metodologias e *softwares*, cuja aplicação combinada procurou escarpelizar os diferentes tipos de dados usados na produção dos diferentes MDE.

A terceira parte encontra-se intimamente relacionada com as anteriores, muito em especial com análise que a antecede. No entanto, procurando concluir o trabalho, relaciona-se também com a primeira parte, especialmente ao nível da avaliação das vantagens e desvantagens. Além disso, nesta parte e perante as conclusões anteriores, procuram também aferir-se de possíveis oportunidades de desenvolvimento para a utilização dos dados ALS.

Ao nível da área de estudo, será de salientar que à medida que se desenvolve o trabalho, se verifica uma evolução em termos de escala, passando a análise a ser efetuada a cada vez maiores escalas. Inicialmente, a análise comparativa centra-se numa área da Galiza em Espanha, subordinando-se, aquando da análise das características hidrológicas, à bacia hidrográfica do principal rio da área de estudo, o rio de Mougás, e, na comparação final, referente à modelação hidráulica, a parte do referido rio.

2. DETEÇÃO REMOTA

2.1. Breve reflexão histórica sobre o desenvolvimento da detecção remota

O termo detecção remota foi utilizado pela primeira vez pelo “U. S. Office of Naval Research”, mais concretamente por Evelyn Pruitt, nos anos 60 (Cracknell e Hayes, 1991; Rees, 2001), e, de lá para cá, várias definições lhe foram atribuídas. De forma simples, tal como é referido por diversos autores (Rees, 2001; Konecny, 2003; Elachi e Van Zyl, 2006; Schott, 2007), a detecção remota é a área de estudo associada à extração da informação sobre um objeto sem entrar em contato direto com o mesmo.

Contudo, tal definição apresenta-se algo vaga, possibilitando várias interpretações, nomeadamente no que concerne ao objeto em estudo e à forma de recolha dos dados. Assim, habitualmente, a detecção remota tem como objeto a superfície da Terra¹, os elementos que nela se encontram e a sua atmosfera, utilizando para a recolha dos dados, preferencialmente, a radiação eletromagnética.

Deste modo, a detecção remota poderá ser definida como a ciência e a arte que procura obter informação sobre um objeto, área ou fenómeno, através da análise de dados adquiridos por um sensor que não está em contato direto com esse objeto, área ou fenómeno (Lillesand, 2003; Reddy, 2008).

O processo de trabalho em detecção remota pode, e deverá ser, interpretado como um processo mais vasto, que não implica apenas a aquisição da informação. Segundo Sabins (1997), deverá englobar as etapas de processamento e interpretação dos dados, usualmente morosas e difíceis, mas que se assumem como essenciais para converter a informação, normalmente em grandes quantidades, em informação válida e utilizável em diferentes domínios.

A detecção remota afigura-se como uma área de interesse recente. Contudo, na sua aceção, a sua origem não é nova (Figura 2). O grande passo deu-se com a utilização de aviões no início do século XX e, já em 1909, Wilbur Wright pilotou o avião que recolheu as primeiras imagens sobre o território italiano (Elachi e Van Zyl, 2006; Campbell e Wynne, 2011).

Foi o desenvolvimento da fotografia, a partir de 1839 (Elachi e Van Zyl, 2006), que permitiu fundar o que se entende hoje por detecção remota, ao permitir registar de forma permanente e objetiva uma imagem.

¹ Embora a detecção remota seja usualmente associada à superfície da Terra, tal não deve ser considerado como o único objeto, uma vez que esta é utilizada para a análise da superfície de outros planetas e do fundo do mar.

Em paralelo, à medida que os desenvolvimentos tecnológicos que levaram à descoberta da fotografia progrediam, houve significativos avanços no campo da radiação eletromagnética, com a descoberta da radiação infravermelha, por Herschel (1800), e da radiação ultravioleta, por Ritter (1801), culminando em 1873 com a teoria do eletromagnetismo de Maxwell, a qual fundamenta muitos dos princípios de base da deteção remota. (Rees, 2001; Campbell e Wynne, 2011).

Pensa-se que o primeiro registo de deteção remota ocorreu em 1858 e consistiu numa fotografia obtida por Gaspard-Félix Tounachon a partir de um balão a 80 metros do solo (Rees, 2001; Elachi e Van Zyl, 2006; Campbell e Wynne, 2011). Rapidamente, a técnica se desenvolveu e deu provas da sua importância, ao ponto de em 1890 Batut ter publicado um trabalho sobre o assunto (Rees, 2001).

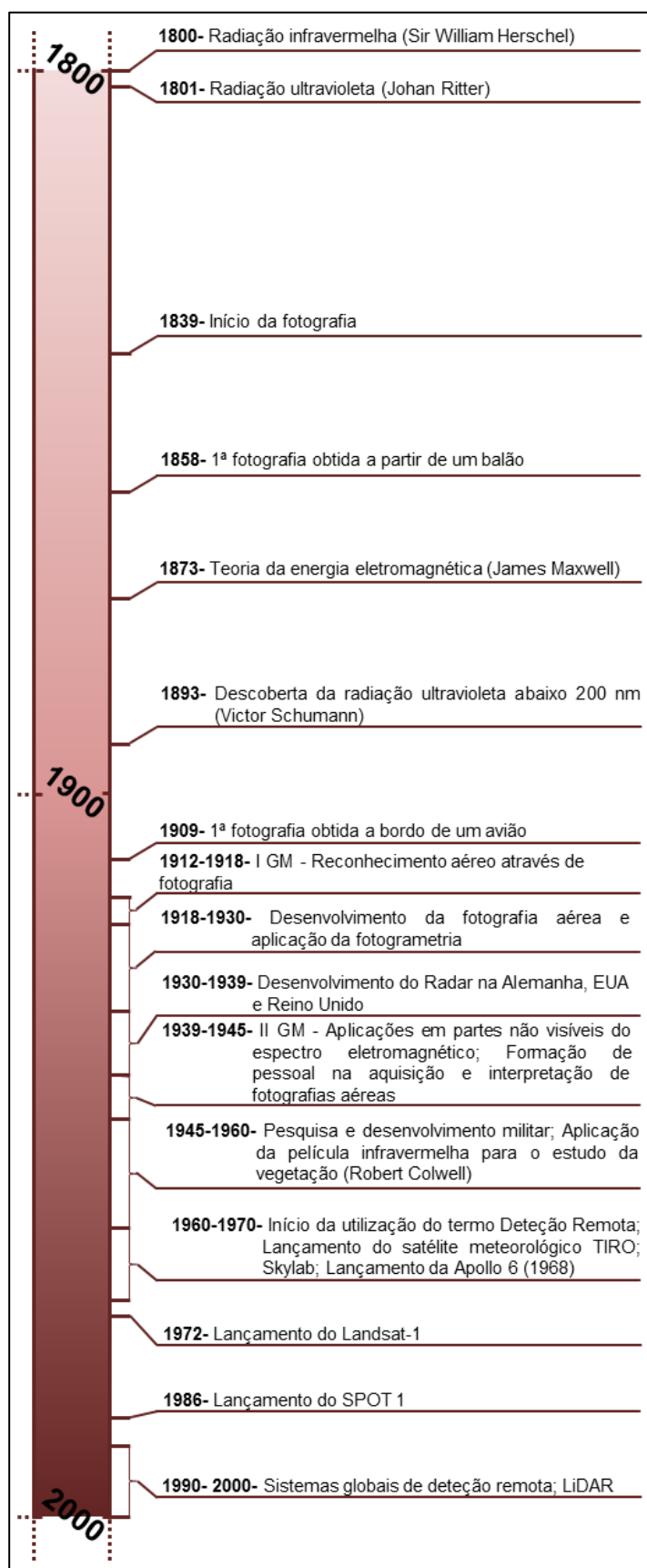


Figura 2- Breve cronologia da deteção remota.

A continuação dos desenvolvimentos levou a um grande reconhecimento da importância da técnica e à sua utilização de forma continuada para reconhecimento militar no decorrer da I Guerra Mundial e ao longo do período entre as duas Grandes Guerras. Paralelamente, verificou-se uma grande evolução da tecnologia e a aplicação da fotogrametria² à fotografia aérea (Rees, 2001; Campbell e Wynne, 2011).

Ao nível civil, assistiu-se a um aproveitamento extraordinário deste tipo de informação para diversos ramos, como na cartografia topográfica, na litologia, na geologia, na análise da cobertura vegetal ou na agricultura. Para estas diversas utilizações contribuiu o desenvolvimento simultâneo de recursos técnicos, nomeadamente, das câmaras, dos filmes e dos aviões (Rees, 2001; Campbell e Wynne, 2011).

Como noutras áreas do conhecimento, a II Guerra Mundial provocou nesta matéria um conjunto de desenvolvimentos científicos substanciais, nomeadamente, no âmbito do reconhecimento fotográfico, dos sensores capazes de captar a radiação infravermelha e do sistema radar, assim como permitiu a formação de pessoal altamente qualificado que prosseguiu o desenvolvimento do conhecimento, após o fim da guerra (Campbell e Wynne, 2011).

Na década de 50, as películas de cor falsa infravermelha, desenvolvidas em meio militar, foram aplicadas no âmbito do estudo da vegetação e desenvolveram-se as imagens de radar de grande resolução (Elachi e Van Zyl, 2006). No final da década (1958) é aprovado o projeto Corona, o primeiro projeto de deteção remota (Olsen, 2007).

Na década de 60, prossegue a evolução das técnicas anteriores e assiste-se a um novo marco no desenvolvimento da deteção remota, com o início da colocação de sensores no espaço a bordo de satélites artificiais, sendo obtida a primeira imagem multiespectral da Terra pela *Apollo 6* (Rees, 2001).

Ao longo desta década desenvolveram-se vários projetos de deteção remota por satélites, embora o primeiro caso de verdadeiro sucesso se tenha dado com o início do projeto Landsat-1, inicialmente chamado de ERTS – *Earth Resources Technology Satellite*, desenvolvido em 1972, pela NASA (U.S. *National Aeronautics and Space Administration*), projeto que se mantém até à atualidade, em paralelo com o surgimento de outros que foram acrescentando progressivamente mais dados sobre o planeta Terra (Rees, 2001; Elachi e Van Zyl, 2006). Posteriormente, a década de 80 assistiu à chegada de sensores com a capacidade de resolução espacial de 30, 20 e 10 metros e a década seguinte viu os sensores chegarem à capacidade métrica e submétrica, o que abriu novas oportunidades em termos de aplicações sobre estes dados (Campbell e Wynne, 2011).

² Segundo Campbell e Wynne (2011), a Fotogrametria é a técnica responsável pela realização de medições rigorosas a partir de fotografias, aplicando princípios da ótica, o conhecimento da geometria interior da câmara e a sua orientação, para reconstruir as dimensões e posições dos objetos representados.

Papel importante assume também o desenvolvimento da informática, quer ao nível do *hardware*, quer ao nível do *software*, o que tem permitido tratar dados em quantidades cada vez maiores e de forma mais eficiente, sendo este um vetor-chave, tanto para a utilização dos dados fornecidos pelos satélites, como para a sua divulgação.

Numa altura em que a deteção remota “olhava” cada vez mais para a plataforma espacial, a utilização e divulgação dos *lasers* e dos *lasers scanners*, cujo uso tinha registado desenvolvimentos o longo das décadas anteriores, e, mais propriamente, a aplicação desta tecnologia associada a plataforma aérea em meados da década de 90, levou à definição de uma tecnologia de deteção remota, o *Airborne Laser Scanning* ou *Airborne Lidar*. Esta tecnologia distinguiu-se das restantes, ganhando rapidamente vigor, uma vez que veio permitir a aquisição de dados georreferenciados e tridimensionais da superfície terrestre de forma rápida, pormenorizada e em grandes quantidades (Wehr, 2008b; Large e Heritage, 2009; Campbell e Wynne, 2011; Lemmens, 2011).

2.2. A radiação eletromagnética e os sensores

No seguimento do conceito de deteção remota, além da plataforma a partir da qual se obtêm os dados e os produtos resultantes, é essencial compreender o papel dos sensores e a sua associação à radiação eletromagnética, elemento base do desenvolvimento da deteção remota.

A deteção remota parte do princípio de que todos os objetos refletem e emitem energia, ou seja, radiação eletromagnética e procura captar esta energia refletida (Campbell e Wynne, 2011).

A energia eletromagnética pode ser gerada sob diferentes formas, embora a principal origem esteja nas reações nucleares do Sol, que emite radiação eletromagnética na totalidade do espectro (Campbell e Wynne, 2011). Esta radiação é composta por ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo a uma velocidade constante de aproximadamente 300000 km/s (299792 km/s). O conjunto das radiações eletromagnéticas, composto por diferentes tipos de ondas, designa-se por espectro eletromagnético.

A radiação eletromagnética é composta por duas componentes (Figura 3), um campo elétrico e um campo magnético. O campo elétrico varia em magnitude numa direção perpendicular à direção de propagação. O campo magnético, orientado em ângulos retos em relação ao campo elétrico, é propagado em fases com o campo elétrico (Campbell e Wynne, 2011).

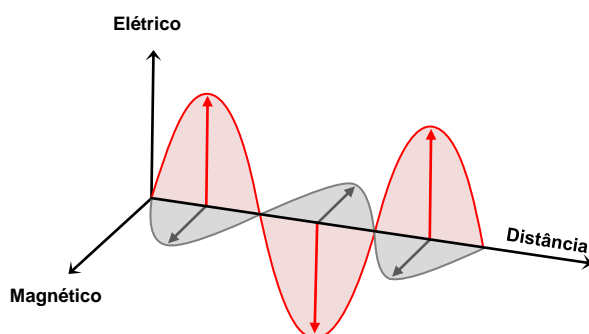


Figura 3- Componentes da radiação eletromagnética (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001).

A distinção entre os diferentes tipos de radiação do espectro eletromagnético (Figura 4) é efetuada através do comprimento da onda, frequência, amplitude, sendo também considerado como complemento a diferença de fase (Campbell e Wynne, 2011).

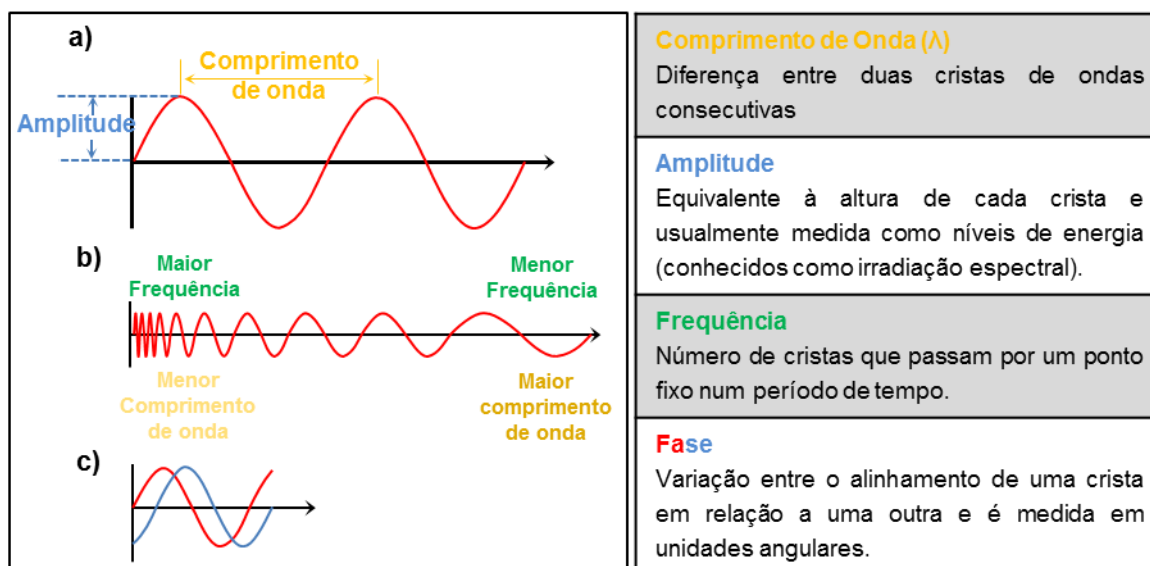


Figura 4- Propriedades da energia eletromagnética. a) Comprimento de onda e amplitude; b) Frequência; c) Fase. (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001).

Será também de reter que a velocidade de circulação da energia eletromagnética (c) é, constante, como referido, e que apresenta uma relação entre a frequência (ν) e o comprimento de onda (λ) (Campbell e Wynne, 2011), conforme expresso na seguinte equação:

$$c = \lambda \nu$$

Será por este motivo, que as características da energia eletromagnética podem ser apresentadas em relação ao comprimento de onda (medida em Angstroms [\AA], nanómetros [nm], micrómetros [μm], milímetros [mm], etc., conforme o comprimento em questão)³, ou em relação à frequência (em hertz [Hz], kilohertz [kHz], megahertz [Mhz], entre outros, conforme a

³ 1 \AA = 10^{-10}m ; 1nm = 10^{-9}m ; 1 μm = 10^{-6}m ; 1mm = 10^{-3}m

frequência em questão)⁴. No campo da detecção remota, não existindo padrão, usualmente é utilizado o comprimento de onda como referência e a escala métrica como escala de representação (Campbell e Wynne, 2011).

Segundo as propriedades apresentadas pelas ondas, estas são designadas por diferentes formas. Neste âmbito, ressalve-se que não se verifica uma uniformização das divisões utilizadas, sendo os intervalos usados definidos de forma diferente entre disciplinas (Campbell e Wynne, 2011). A tabela 1 e a figura 5 apresentam as principais divisões do espectro eletromagnético e os seus limites.

Divisões	Limites
Raios Gama	< 0,03 nm
Raios-X	0,03 – 300 nm
Ultravioleta	0,30 – 0,38 µm
Luz visível	0,38 – 0,72 µm
Radiação infravermelha	0,72 µm – 15 µm
Infravermelho próximo	0,72 – 1,30 µm
Infravermelho médio	1,30 – 3,00 µm
Infravermelho distante	7,2 µm – 15 µm
Micro-ondas	15 µm – 30 cm
Ondas Rádio	≥30 cm

Tabela 1- Principais divisões do espectro eletromagnético e respetivos limites. (Adaptado de Campbell e Wynne, 2001)

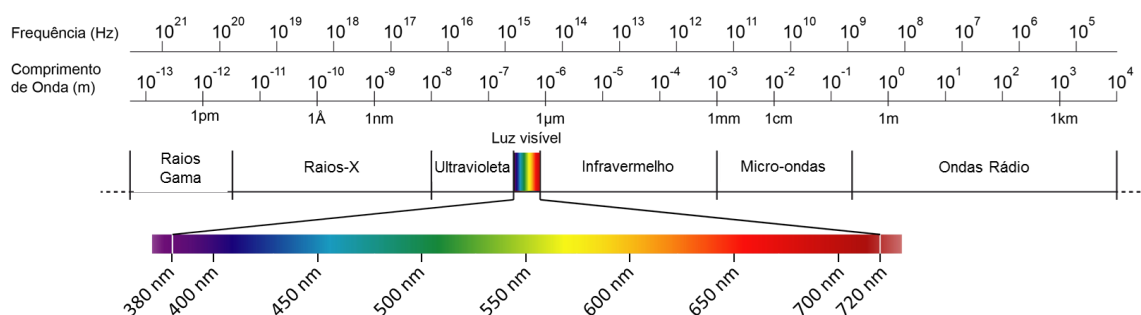


Figura 5- Principais divisões do espectro eletromagnético

Tradicionalmente, em detecção remota é utilizado o intervalo espectral compreendido entre 0,38 µm e 3 µm (Campbell e Wynne, 2011). Contudo, os sensores que possuem a capacidade de leitura de radiação infravermelha térmica implicam a utilização de comprimentos de onda que vão desde os 3 aos 14 µm e os sensores que captam micro-ondas operam em comprimentos de onda compreendidos entre 1cm e 1m (Maini e Agrawal, 2011).

A energia eletromagnética é assim utilizada como o meio através do qual a informação é transmitida de um objeto até ao sensor. A informação é codificada na frequência, intensidade ou polarização da onda eletromagnética. Esta informação propaga-se pela radiação eletromagnética

⁴ 1kHz= 10³ Hz; 1Mhz= 10⁶ Hz

de forma direta, ou indiretamente através de reflexão, dispersão e refração, até ao sensor (Elachi e Van Zyl, 2006).

A utilização de sensores torna-se, assim, um fator fundamental desta equação, uma vez que são eles que têm a capacidade de apreender a realidade através da captação da energia. Estes sensores, como evidenciamos anteriormente, podem ser acoplados a diferentes tipos de plataformas – espaciais, aéreas ou terrestres – que condicionam os tipos de sensores utilizados e a informação proveniente (Figura 6).

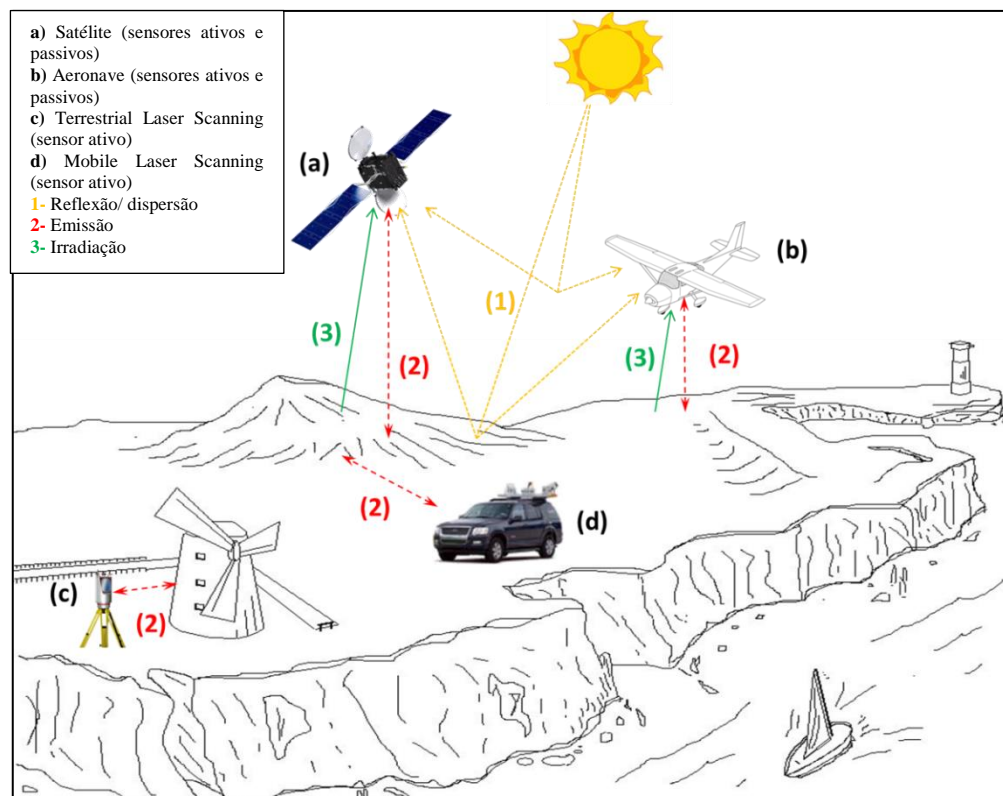


Figura 6- Plataformas, sensores e formas de detecção remota.

De forma simples, os sensores são classificados como passivos ou ativos consoante a sua capacidade de emitir ou não energia.

No primeiro caso, o Sol desempenha um papel fundamental, uma vez que emite a energia eletromagnética que será refletida pelo objeto e medida pelo sensor, ou então o sensor capta, em simultâneo ou não, a irradiação de energia dos objetos da superfície terrestre, resultante da absorção e transformação da energia solar. Por seu lado, os sensores ativos possuem uma fonte de energia própria e têm por isso, têm a capacidade de emitir a energia que vão medir, podendo funcionar, teoricamente, em qualquer parte do espectro eletromagnético. No entanto, esta capacidade é limitada pela “transparência” da atmosfera (Rees, 2001; Campbell e Wynne, 2011; Maini e Agrawal, 2011). O cruzamento dos dois vetores enunciados permite organizar os sensores mais utilizados em detecção remota, como pode observar-se na tabela 2.

Refira-se que os sensores usados nas plataformas espaciais podem, de forma geral e com as devidas alterações, ser aplicados em plataformas aéreas. No entanto, não é comum a utilização de todos os tipos, especialmente pela falta de utilidade da informação obtida.

Os sensores ativos que usam o laser e as câmaras analógicas/ digitais utilizadas nas plataformas aéreas e terrestres funcionam sobre os mesmos princípios, contudo, apresentam especificidades técnicas adaptadas às plataformas a que se encontram acoplados.

Sensor \ Plataforma	Espacial	Aéreo	Terrestre
Ativo	<ul style="list-style-type: none"> • Altimetros de micro-ondas (<i>Microwave altimeters</i>); • Altimetros de radar (<i>Radar altimeters</i>) • Distanciómetros laser (<i>Laser distance meters</i>) • Escaterómetro de micro-ondas (<i>Microwave scatterometers</i>) • Radar de Abertura Real (<i>Real Aperture Radar – RAR</i>) • Radar de Abertura Sintética (<i>Synthetic Aperture Radar- SAR</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Distanciómetros laser • Altimetros de radar • Altimetros de micro-ondas 	<ul style="list-style-type: none"> • Terrestrial Laser Scanning (TLS) • Mobile Laser Scanning (MLS) • Radar
Passivo	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores hiperespectrais (<i>Hyperspectral sensor</i>) e multiespectrais (<i>Multispectral sensor</i>) • Radiómetros de micro-ondas (<i>Microwave radiometers</i>) • Sensores magnéticos (<i>Magnetic sensors</i>) • Gravímetros (<i>Gravimeters</i>) • Espectrómetros (<i>Spectrometers</i>) • Radiómetro de infravermelho térmico (<i>Thermal Infrared radiometer</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Câmara analógica e digital • Sensores hiperespectrais e multiespectrais 	<ul style="list-style-type: none"> • Câmara analógica e digital

Tabela 2- Plataformas, sensores utilizados na deteção remota. Conceitos e designações usadas por Rees (2001), Konecny (2003), Mather (2004), Elachi e Van Zyl (2006), Borengasser *et al.* (2007), Liu e Mason (2009); Maini e Agrawal (2011).

É importante referir que os sensores associados a plataformas espaciais e aéreas também podem ser classificados como sensores de varrimento ou de não-varrimento. Os sensores de não-varrimento adquirem a informação sobre a área em questão de uma única vez, enquanto os sensores de varrimento adquirem a informação de forma sequencial à medida que o sensor e a plataforma onde se encontra se movem, sendo o produto final um conjunto de sobreposições de imagens individuais (Maini e Agrawal, 2011).

Pelo exposto é possível perceber que a deteção remota assenta, na atualidade, em diferentes tecnologias, em que se destaca a utilização dos sensores a laser, especialmente para a medição de altimetria nos três tipos de plataformas, e a utilização de sensores multiespectrais e hiperespectrais, quer nas plataformas espaciais, quer nas plataformas aéreas.

3. LIGHT DETECTION AND RANGING (LiDAR)

O presente trabalho assenta em grande parte na exploração de dados obtidos através da tecnologia LiDAR, especificamente do *Airborne Laser Scanning* ou *Airborne Lidar*. Desta forma, será sobre estas tecnologias que importa refletir desde já, precisando conceitos e ponderando aspetos que as tornam marcantes, diferenciadoras e uma janela de oportunidades na atualidade. Assim, serão tratadas primeiramente questões genéricas do LiDAR, tais como *o que é?... como de se desenvolveu?... quais os tipos de LiDAR existentes?* De seguida, será abordado o ALS, o verdadeiro cerne da questão, de diversas formas, desde os princípios de funcionamento, os tipos de dados que produz, até às suas aplicações e utilização em Portugal.

3.1. LiDAR: uma definição

A definição associada à designação LiDAR aparece na literatura de referência com diferentes aceções, com diferentes abordagens e sem uma definição clara, podendo apenas ser intuída pela leitura das ideias dos autores. As diferenças de base na abordagem ao conceito resultam quase sempre da perspetiva dada pelo autor e é frequentemente direcionada pela sua área de investigação.

A dificuldade em encontrar uma definição clara para o conceito aumenta devido à utilização de diferentes designações como sinónimas (Tabela 3). Na leitura da literatura de referência é possível encontrar diferentes terminologias, quer para a designação da tecnologia LiDAR de uma forma geral, quer para a designação de diferentes subtecnologias⁵, consoante a plataforma utilizada.

Neste sentido, além, obviamente, da designação LiDAR, que é usada como sinónima de todas as restantes denominações utilizadas, quer da técnica geral, quer das subtecnologias, é possível de destacar outras designações.

No que concerne à técnica em geral, a expressão *Laser scanning* surge de forma quase tão comum como LiDAR, impondo-se, à semelhança desta última, como sinónimo de todas as subtecnologias. Desta forma, não será de estranhar tanto que, no que respeita às plataformas aéreas, terrestre fixas e terrestres móveis, surjam com mais frequência, respetivamente, as expressões *Airborne Laser Scanning*, *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) e *Mobile Laser Scanning* (MLS). Não será de desprezar, deste modo, a utilização das expressões *Airborne Lidar*, *Terrestrial Lidar* e *Mobile Lidar*, que surgem com frequências equivalentes às inicialmente referidas, podendo a diferença verificada ser o resultado das fontes utilizadas.

⁵ Embora cientes da inexistência na Língua Portuguesa do termo “subtecnologias”, este foi aqui utilizado para exprimir a subordinação, especificidade, dependência de um conjunto de tecnologias específicas à tecnologia mais abrangente que é o LiDAR, procurando-se evitar confusões na interpretação das ideias expostas.

Parece-nos, assim, que as designações *Laser Scanning* e LiDAR e as denominações que utilizam estas expressões como “sufixo” deverão constituir a terminologia preferencial na referência à referida tecnologia e subtecnologias, respetivamente.

Designações mais frequentes	Outras designações encontradas
LiDAR (Light Detection and Ranging)	Laser Scanning
	Laser Altimetry
	Laser radar
	LADAR (LASER Detection and Ranging)
	Laser Direction and Ranging
	Laser Imaging Detection and Ranging
Spaceborne LiDAR	Spaceborne Laser Scanning
Airborne Laser Scanning (ALS)	Airborne LiDAR
	Airborne Topographic LiDAR
	Aerial Laser Scanning
	Airborne Laser Altimetry
	Laser Scanning from Air
	Airborne scanning laser altimetry
	Airborne laser scanner
	Aerial LiDAR
	Terrestrial LiDAR
Terrestrial Laser Scanning (TLS)	Static Terrestrial Laser Scanner
	Ground-based Laser Scanner
	Mobile LiDAR
Mobile Laser Scanning (MLS)	Terrestrial mobile mapping
	Mobile mapping

Tabela 3- Designações utilizadas na bibliografia de referência para nomear a tecnologia LiDAR⁶

No entanto, a generalidade dos autores utiliza diferentes designações dadas para o mesmo conceito como verdadeiros sinónimos e de forma natural na exposição das suas ideias, o que revela uma vulgarização e alguma confusão da terminologia a que os utilizadores dos dados destas tecnologias se devem habituar.

Em comum, todos os autores reconhecem a expressão LiDAR e as subtecnologias como associadas à obtenção de dados com o recurso à utilização de um sensor laser ativo, o que se coaduna com o significado do acrónimo LiDAR, *Light Detection and Ranging*, ou seja, deteção e medição através da luz.

As diferenças na abordagem de base ao conceito LiDAR na literatura observam-se, sobretudo, aquando da associação do sensor laser a uma plataforma e neste âmbito as perspetivas podem ser bastante diferentes, consoante a fonte consultada, mesmo tendo como referência fontes generalistas de deteção remota. Alguns autores, como Lefsky (2002), Turner (2003), Webster e Dias (2006), Olsen (2007), Habib (2008a), Crutchley (2009), Campbell e Wynne (2011), Werbrouck (2011) e Gonçalves e Pereira (2010b), associam a expressão à obtenção de

⁶ Para referências dos autores que utilizam as diferentes designações, consultar a tabela 39 no Anexo I

dados a partir de plataformas aéreas. Outros, como Winker *et al* (1996), Bufton e Blair (1996), Rowlands *et al* (2000), Zwally *et al* (2002) Winker *et al* (2007), Lefsky *et al* (2011) colocam a ênfase nas plataformas espaciais. Já Browell (1998), Lefsky *et al* (1999a), Rees (2001), Luthcke (2002), Mather (2004), Rees (2006), Petrie e Toth (2008a) e Liu e Mason (2009), entre outros, utilizam a expressão para designar quer as plataformas aéreas, quer as espaciais. Outros, ainda, como Pfeifer e Briese (2007a), Wehr (2008a), Charlton *et al* (2009), Heritage e Large (2009), Hetherington (2009), Large e Heritage (2009), Vosselman e Maas (2010) e Lemmens (2011), diferenciam na exposição das suas ideias, as plataformas aéreas e as terrestres. Por fim, segundo alguns autores, como Flamant (2005), Singh *et al* (2005), Pfeifer e Brise (2007b), Danson *et al* (2009), Devereux e Amable (2009), van Leeuwen e Nieuwenhuis (2010) a expressão engloba todas as plataformas: terrestres, aéreas e espaciais.

Perspetivas divergentes são dadas, também, pelo “objeto” alvo de medições. Alguns autores colocam a tónica na medição de aspetos relacionados com a atmosfera (composição, estrutura, aerossóis, ozono e poluentes), ou aspetos meteorológicos (ventos, temperatura, nuvens, ...) (Browell *et al.*, 1998; Rees, 2001; Flamant, 2005; Singh *et al.*, 2005; Weitkamp, 2005), outros subordinam a sua abordagem da técnica à superfície terrestre e aos elementos que a ocupam (Lefsky *et al.*, 1999a; Lefsky *et al.*, 2002; Wehr, 2008a; Liu e Mason, 2009; van Leeuwen e Nieuwenhuis, 2010; Campbell e Wynne, 2011), alguns há, ainda, que admitem que a técnica engloba a existência de ambos (Bufton e Blair, 1996; Zwally *et al.*, 2002; Mather, 2004; Olsen, 2007; Heritage e Large, 2009; Large e Heritage, 2009; Large *et al.*, 2009; Maini e Agrawal, 2011; Paine e Kiser, 2012)

Com tudo o que foi aludido, e como já se referiu anteriormente, a definição associada ao conceito de LiDAR encontra-se fortemente associado à perspetiva do autor e aos seus interesses enquanto investigador, embora os princípios de base (à frente referidos) sejam os mesmos, pelo que esta expressão deverá contemplar todas as diversas subtecnologias que utilizam um sensor laser ativo para efetuar a medição de distâncias e que se diferenciam por especificidades, quer sejam da plataforma que utilizam, quer do “objeto” mensurado.

Parece-nos, assim, que a designação LiDAR (*Light Detection And Ranging*) serve para se referir à tecnologia de deteção remota que efetua medições de grande precisão sobre “objetos”⁷, determinando a sua posição e outras propriedades, utilizando a reflexão da luz emitida por um sensor laser, que atua nas partes visível, infravermelho e do ultravioleta do espectro eletromagnético.

Contudo, parece-nos que, embora correto, o uso generalizado do termo LiDAR em todos os contextos de recolha de dados da forma referida pode levar a equívocos, pelo que seria

⁷ Neste contexto, o termo objeto deverá ser interpretado num sentido lato, referindo-se, quer à superfície terrestre, aos elementos que nela se encontram, às superfícies submersas (fundos oceânicos, de mares, lagos, rios, ...), à atmosfera, às superfícies planetárias que não a Terra ou outros corpos celestes como satélites naturais e asteroides.

importante que ocorresse uma utilização apropriada da terminologia, de acordo com as especificidades da subtecnologia usada, tendo como base os dois aspetos enunciados – plataforma e objeto mensurado – ou mesmo, a criação de designações particulares para técnicas desenvolvidas com objetivos específicos, como o efetuado em relação ao projeto *Vegetation Canopy LiDAR* (VCL), projeto de recolha de dados LiDAR sobre a vegetação e a topografia, a partir de uma plataforma espacial (Lefsky *et al.*, 1999a; Lefsky *et al.*, 1999b; Rowlands *et al.*, 2000; Mather, 2004; Browell *et al.*, 2005; Petrie e Toth, 2008a; Large *et al.*, 2009; Paine e Kiser, 2012), ou o *Laser Vegetation Imaging Sensor* (LVIS) (Blair *et al.*, 1999; Drake *et al.*, 2002; Browell *et al.*, 2005; Petrie e Toth, 2008a; Danson *et al.*, 2009; Devereux e Amable, 2009) desenvolvido com os mesmos propósitos, mas a partir de uma plataforma aérea. Assim, podemos distinguir diferentes subtipos de LiDAR conforme se encontra patente na figura 7.

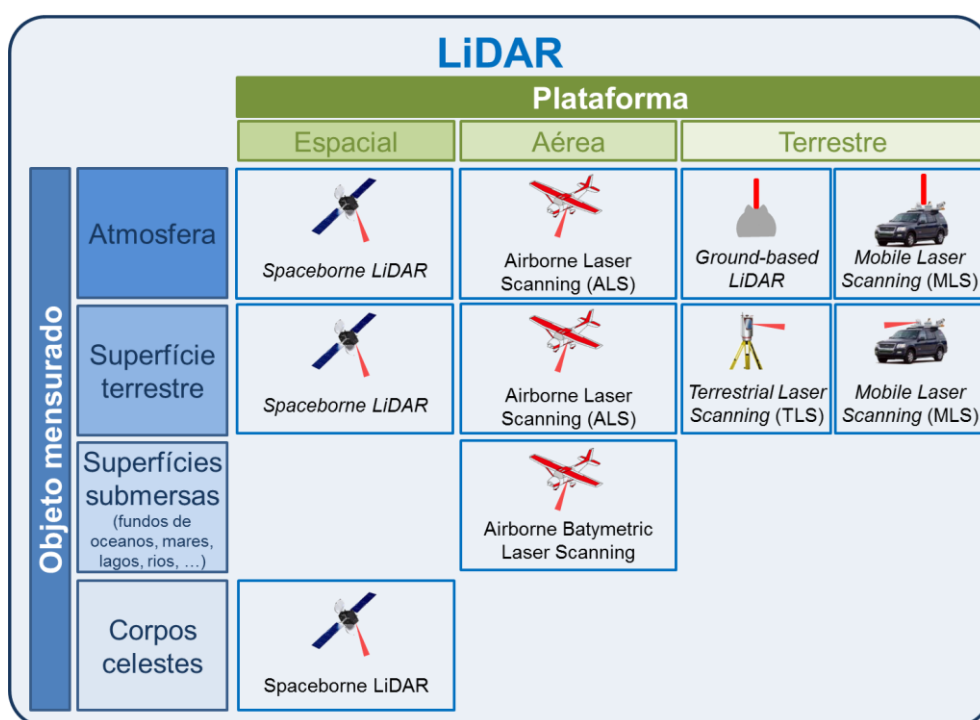


Figura 7- Designações do LiDAR segundo a plataforma e o objeto mensurado⁸

Na realidade, a classificação efetuada é apenas uma de entre outras possíveis e pretende apenas contribuir para a sistematização dos conhecimentos, já que, segundo Weitkamp (2005), existem muitas formas de classificar os sistemas LiDAR: pelo efeito físico usado, por objetivo, pelo comprimento de onda, por tecnologia, por tipo de plataforma, entre outras.

No presente trabalho, não cabe a exploração de todas as subtecnologias enunciadas, pelo que, doravante, a ênfase será colocado no ALS, efetuando-se, porém, algumas abordagens pontuais às restantes tocando em aspetos incontornáveis para uma melhor compreensão da primeira.

⁸ A não realização de traduções para língua portuguesa prende-se com o facto de já existirem múltiplas designações para estes conceitos, pelo que se procurou não contribuir para o incremento da confusão em redor da temática. A expressão *Mobile Laser Scanning*, também denominada de *Terrestrial Mobile Mapping* ou *Mobile Mapping*, é utilizada para designar a colocação de um sensor laser a bordo de qualquer plataforma móvel (Lemmens, 2011), como carros, barcos, comboios.

3.2. Do passado ao presente do LiDAR - breves apontamentos históricos

A designação LiDAR parece ter cunho em 1953, por Middleton e Spilhaus, ao estabelecerem uma analogia com a palavra radar, também ela resultante do acrónimo *RADAR - Radio Detection and Ranging* (Flamant, 2005; van Leeuwen e Nieuwenhuis, 2010), demonstrando assim a proximidade das duas técnicas, que diferem essencialmente nos comprimentos de onda que são utilizados (Flamant, 2005).

Os princípios de funcionamento do LiDAR desenvolveram-se, sobretudo, com utilizações relacionadas com a atmosfera, mesmo antes da invenção do laser (Campbell e Wynne, 2011), cuja descoberta revolucionou a tecnologia (Figura 8). Isto, obviamente, sem ignorarmos diversos contributos da ciência, alguns deles já anteriormente abordados, ou contribuições como a de Albert Einstein para este propósito, em 1917.

Como é apresentado por Argall e Sica (2007) e Heritage e Large (2009), a ideia inicial surge em 1930 por Synge, que postula a possibilidade de determinar a densidade da atmosfera através da medição da reflexão de um raio de luz.

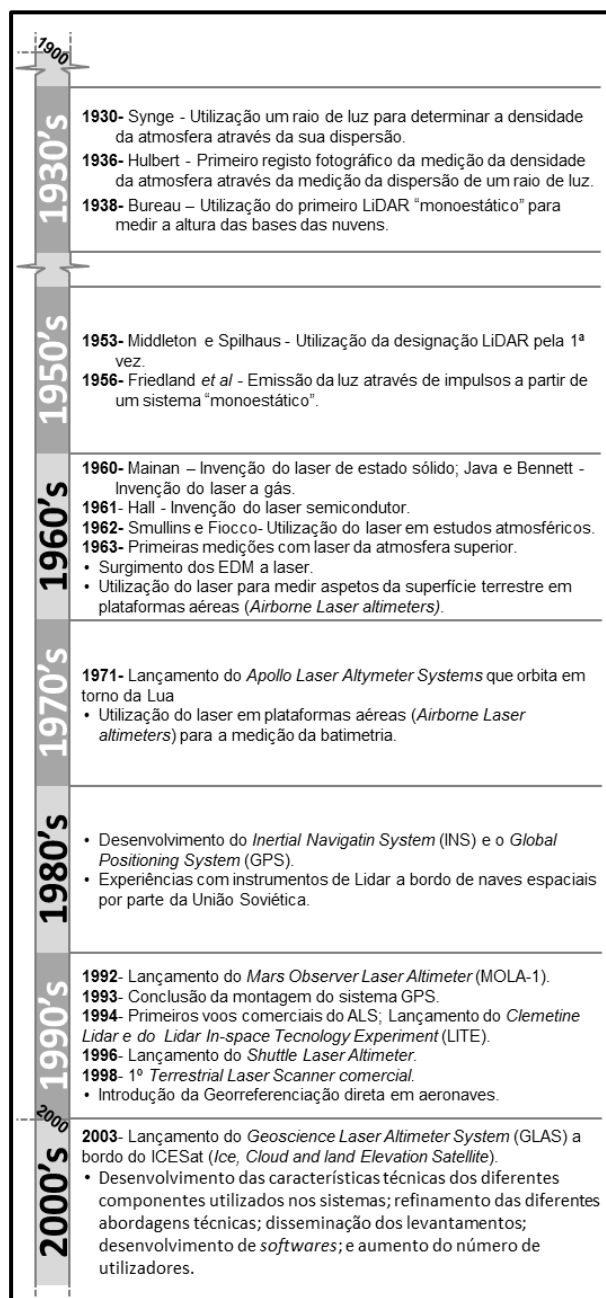


Figura 8- Breve cronologia do LiDAR

O primeiro relato conhecido da aplicação destes princípios com sucesso é de Duclaux, sendo o primeiro registo fotográfico da aplicação desta técnica, de Hulbert em 1936, que regista a reflexão do raio de luz a uma altitude de 28 Km (Argall e Sica, 2007). O primeiro uso de um LiDAR monoestático, ou seja, com o transmissor e recetor colocados em conjunto, semelhantes aos sistemas atuais, data de 1938 e foi utilizado por Bureau para medir as altura das bases das nuvens (Argall e Sica, 2007).

O desenvolvimento mais significativo da técnica que se seguiu, verificou-se em 1956 quando Friedland *et al.* utilizaram a emissão da luz através de impulsos a partir de um sistema monoestático (Heritage e Large, 2009). Todavia, é com a invenção do laser de estado sólido, por Maiman, e do laser a gás, por Javan e Bennett, ambos em 1960, e do laser semiconductor em 1962 por Hall, que a tecnologia ganha um ímpeto fundamental no seu desenvolvimento, reunindo condições para se desenvolver e aplicar em diferentes domínios (Argall e Sica, 2007; Petrie e Toth, 2008b).

O reconhecimento das vantagens da utilização do laser foi imediatamente verificado, uma vez que possibilitava a obtenção de melhores resultados e maior flexibilidade quando comparada esta técnica com outras técnicas óticas não utilizadoras de laser, e por possibilitar uma melhoria da técnica do radar em estudos meteorológicos, nomeadamente na deteção de partículas de muito pequenas dimensões (Flamant, 2005). Desta forma, logo em 1962, Smullins e Fiocco foram os primeiros a utilizar a luz de um laser nos estudos atmosféricos (Argall e Sica, 2007; Heritage e Large, 2009) e, em 1963, fizeram-se as primeiras medições da atmosfera superior (Flamant, 2005).

Também por esta altura, o laser começa a ser utilizado como ferramenta no âmbito da topografia e da engenharia civil (Petrie e Toth, 2008b). Desenvolvem-se os *Electronic Distance Meter* ou *Electronic Distance Measuring device* (EDM) a laser, cuja utilização se desenvolve a partir da década de 70 do século XX (Large *et al.*, 2009), sendo esta uma tecnologia muito importante no desenvolvimento da tecnologia de medição de distâncias, a qual viria a ser aplicada no *Terrestrial Laser Scanning* e noutras plataformas (Petrie e Toth, 2008b).

A utilização do laser em plataformas aéreas inicia-se, também, na década de 60 do século XX (Browell *et al.*, 2005; Petrie e Toth, 2008b; Lemmens, 2011) para a medição de aspetos da superfície terrestre (Browell *et al.*, 2005), embora também tenha sido conceptualizada na altura a sua utilização para a medição da batimetria, o que só foi operacionalizado na década seguinte (Irish e Lillycrop, 1999).

Mesmo com os desenvolvimentos levados a cabo nas décadas de 70 e 80, a aplicação deste tipo de técnica em plataformas aéreas era bastante mais rudimentar, uma vez que faltava o desenvolvimento de tecnologia de suporte que apenas surgiria mais tarde, especialmente no que diz respeito à determinação rigorosa da localização da posição dos dados mensurados, que se assumia como um problema inultrapassável (Petrie e Toth, 2008b; Lemmens, 2011).

Quando utilizados unicamente para a obtenção de dados topográficos, estes instrumentos eram conhecidos como *Airborne Laser altimeters* e funcionavam com a emissão de um laser a partir de um avião na posição de nadir (Campbell e Wynne, 2011). Nesta altura, seria apenas possível medir distâncias ao longo de uma única linha que resultava do movimento do avião, obtendo-se um perfil de elevação, o que inviabilizava largamente a utilização da técnica em

grandes áreas do terreno, já que seriam necessárias inúmeras linhas de voo. (Petrie e Toth, 2008b; Campbell e Wynne, 2011; Paine e Kiser, 2012). Apesar das limitações óbvias e da distância para os dados atuais, era possível obter um conjunto muito denso de observações que eram utilizadas como ferramentas de pesquisa em diferentes áreas, como a topografia, a vegetação, a hidrografia, a atmosfera, etc (Campbell e Wynne, 2011).

A década de 70 do século XX assistiu não só ao desenvolvimento da aplicação do LiDAR em plataformas aéreas, mas também nas plataformas espaciais (Mallet e Bretar, 2009). Nesse sentido, a NASA desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento de toda esta tecnologia (Ackermann, 1999).

Esta nova etapa da utilização do LiDAR e da epopeia espacial inicia-se com o projeto Apollo Laser Altimeter Systems, que orbitou em torno da Lua em 1971 (Singh *et al.*, 2005).

Na década de 80, inicia-se o desenvolvimento das tecnologias que convergiram para o estado da arte atual da tecnologia LiDAR, especialmente no que concerne às plataformas aéreas, que, como referido, apresentava fortes limitações. Neste domínio, será de destacar o desenvolvimento e integração de duas tecnologias: o *Inertial Navigation System* (INS) e o *Global Positioning System* (GPS) (King, 1998; Campbell e Wynne, 2011).

O desenvolvimento do INS, mais especificamente da tecnologia *Inertial Measurement Unit* (IMU)⁹, cuja evolução se vinha a processar no âmbito espacial e militar, permitiu o rigoroso controlo e gravação da orientação da aeronave (assunto desenvolvido em páginas seguintes), enquanto o sistema GPS veio permitir a obtenção de registos rigorosos da localização da aeronave e dos dados adquiridos pela utilização do LiDAR.

O início da década de 90 vislumbrou, com a integração destes sistemas (IMU e GPS), os primeiros exercícios de georreferenciação direta¹⁰ a bordo de aeronaves, embora o sistema GPS ainda não se encontrasse ainda, à época, completamente funcional (El-Sheimy, 2008).

Em simultâneo com o contínuo desenvolvimento do IMU e do GPS, grandes progressos foram efetuados no campo da informática e da capacidade de computação (Petrie e Toth, 2008b), fator fundamental para a integração das tecnologias.

Assim, é na década de 90 que o LiDAR, especialmente o ALS e o MLS, dá um grande salto em termos de desenvolvimento da tecnologia, permitindo determinar a localização absoluta no espaço tridimensional das medições das distâncias efetuadas pelo laser. Com a conclusão da montagem da constelação de 24 satélites da rede GPS em 1993 e a sua total operacionalidade, criaram-se as condições fundamentais para viabilidade económica do ALS. Assim, em 1994

⁹ O IMU é um instrumento eletrónico que mede e regista a velocidade, orientação e forças gravitacionais de uma aeronave, usando uma combinação de acelerómetros e giroscópios.

¹⁰ Sintetizando as ideias apresentadas por El-Sheimy (2008), o processo de georreferenciação direta consiste no processo de atribuição de coordenadas x, y e z, num sistema de coordenadas global, aos dados mensurados, utilizando um sistema integrado composto pelo GPS e o IMU.

efetuaram-se os primeiros voos comerciais de levantamentos de dados (Mandlbürger *et al.*, 2007; Pfeifer e Mandlbürger, 2008; Lemmens, 2011)

Paralelamente, desenvolveu-se a técnica em plataformas espaciais. Após o desenvolvimento de experiências a bordo de naves espaciais com instrumentos de LiDAR, na década de 80, por parte da União Soviética (Garvin *et al.*, 1998), em 1992, os EUA lançaram para o espaço o *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA-1), com o intuito de topografar a superfície de Marte (Garvin *et al.*, 1998).

Também em 1994, voaram para o espaço o projeto *Clementine Lidar*, desenvolvido para mapear a superfície Lunar (Garvin *et al.*, 1998; Singh *et al.*, 2005) e o projeto *LiDAR In-space Technology Experiment* (LITE), cujo desenvolvimento foi destinado, principalmente, a aplicações atmosféricas (Garvin *et al.*, 1998; Mather, 2004; Petrie e Toth, 2008a). Na sequência, outros projetos foram desenvolvidos, como o *Shuttle Laser Altimeter* (1996 e 1997), desenvolvido para estudar a topografia da Terra e a cobertura vegetal (Mather, 2004; Singh *et al.*, 2005; Petrie e Toth, 2008a).

Os desenvolvimentos de âmbito espacial prosseguiram e já no século XXI foi lançado para o espaço em 2003, a bordo do satélite ICESat (*Ice, Cloud and land Elevation Satellite*), o *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), com o principal objetivo de monitorizar o gelo das calotes polares (Mather, 2004; Petrie e Toth, 2008a). Também para este ano esteve previsto o lançamento do projeto *Vegetation Canopy Lidar* (VLC), com fins relacionados com a vegetação e a topografia terrestre. Contudo, apesar de construído o sensor, a missão foi inicialmente adiada e depois cancelada (Petrie e Toth, 2008a).

Em termos espaciais, maiores progressos têm sido limitados, segundo Petrie e Toth (2008b), pela altitude e pela velocidade elevadas da plataforma, que exige uma tecnologia muito mais desenvolvida.

Recuando ao final do século passado, será de salientar o surgimento em 1998 do primeiro *Terrestrial Laser Scanner* de âmbito comercial (Dongzhen *et al.*, 2009), avanço tecnológico que surge, de certa forma, surpreendentemente atrasado, uma vez que as tecnologias que o possibilitam já haviam sido desenvolvidas anteriormente, eram menos complexas que as necessárias para outras plataformas (não se verifica a necessidade de utilização do GPS e do IMU) e já haviam mesmo sido testadas em plataformas mais complexas como as aéreas.

Desde o início do presente século assistiu-se, além do desenvolvimento do LiDAR em plataformas espaciais, sobretudo, ao desenvolvimento das características técnicas dos diferentes componentes utilizados nos sistemas, a um refinamento das diferentes abordagens técnicas, a uma disseminação dos levantamentos, ao desenvolvimento de *softwares* de tratamento de dados e ao aumento do número de utilizadores deste tipo de dados.

3.3. Airborne Laser Scanning (ALS)

Na sequência do que foi dito anteriormente, é fácil compreender em que consiste o ALS. De forma simples, podemos dizer que nesta tecnologia se efetua a medição de distâncias entre uma plataforma e um objeto.

No entanto, um maior aprofundamento da questão poderá levar ao questionamento desta simples definição, pelo que se impõem inserir neste ponto os processos e mecanismos que permitem tal operação. Sendo assim, podemos considerar que esta subtecnologia do LiDAR compreende a utilização de um sensor laser ativo e de um *scanner* ótico-mecânico a bordo de uma plataforma aérea, normalmente um avião, para efetuar a medição da distância entre esta e um “objeto” (e outras propriedades), normalmente a superfície terrestre e os objetos que nela se encontram.

Sendo assim, é importante aprofundar o funcionamento do sistema que permite efetuar tal operação, para que se obtenha uma melhor compreensão dos dados obtidos e das suas potencialidades e debilidades.

3.3.1. Princípios de funcionamento do ALS

O funcionamento do ALS é relativamente simples, embora coadjuvado por tecnologia sofisticada que se encontra coordenada de forma notável, assumindo-se como uma tecnologia de ponta, que combina os melhores desenvolvimentos em diferentes áreas do conhecimento.

O funcionamento do ALS pode ser sintetizado, na nossa opinião, através de três etapas diferentes: planeamento, aquisição dos dados e pós-processamento (Figura 9).

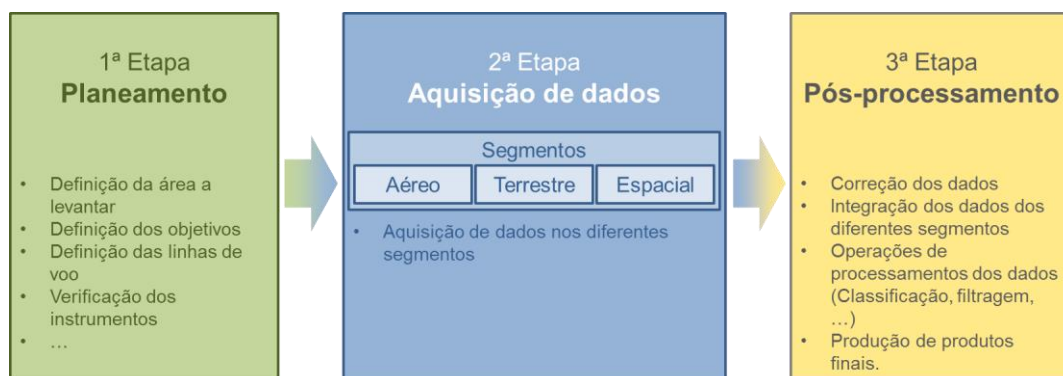


Figura 9- Etapas do ALS.

A fase de planeamento não é uma preocupação aparente na bibliografia de referência, mas, embora secundarizada, não nos parece totalmente de desprezar, dado que será a partir de uma boa definição antecipada dos objetivos, procedimentos e técnicas a utilizar que se tornará possível obter melhores produtos finais.

Por sua vez, a etapa da aquisição de dados é abordada por diferentes autores e em diferentes perspetivas – destacam-se nesta abordagem Baltsavias (1999a; b), Wehr e Lohr

(1999), Pfeifer e Briese (2007a; b), El-Sheimy (2008), Petrie e Toth (2008), Wehr (2008a), van Leeuwen e Nieuwenhuis (2010) e Campbell e Wynne (2011) – assumindo-se como a mais significativa do processo.

A generalidade dos autores anteriores aborda também questões relacionadas com a terceira etapa – o pós-processamento – pela importância inquestionável que apresenta, uma vez que sem ela não será possível o aproveitamento dos dados levantados.

Será sobre estas duas últimas etapas que adiante nos debruçaremos, procedendo a uma abordagem geral, que proporcione uma fácil compreensão do desenvolvimento do ALS.

A etapa do planeamento, embora importante, por ultrapassar o âmbito das nossas intenções, não será abordada. Pode, no entanto, ser aprofundada pela leitura do trabalho de Wehr (2008a).

3.3.1.1. A aquisição de dados

A etapa da aquisição de dados pode, também ela, ser decomposta em três segmentos – aéreo, terrestre e espacial – cuja integração no funcionamento permite a obtenção dos dados.

É nesta etapa que o ALS se assume como revolucionário e como é fácil de compreender pela designação da tecnologia, opera mediante o auxílio de uma plataforma aérea, normalmente um avião, embora também sejam utilizados helicópteros e mesmo UAV's - *Unmanned Aerial Vehicle* (Figura 10).

A compreensão do funcionamento desta etapa e, pela sua importância, do ALS é conseguida pelo entendimento conjunto dos instrumentos acoplados à plataforma aérea e pelo movimento desta, assim como pela integração dos dados desta forma obtidos com os dados provenientes dos segmentos terrestre e espacial. Isto porque os dados finais, são o resultado da combinação das leituras efetuadas pelos diferentes instrumentos intervenientes, pelo que se exige uma leitura combinada dos mesmos.



Figura 10- Tipos de plataformas aéreas utilizadas na recolha de dados ALS.

¹¹ Fonte: http://www.riegl.com/fileadmin/gallery/airborne/als_lms-q560_scannen-bayris-cher-wald.jpg (página consultada no dia 30 de junho de 2012)

¹² Fonte: http://www.riegl.com/fileadmin/gallery/airborne/als_riegl-plane2.JPG (página consultada no dia 30 de junho de 2012)

¹³ Fonte: http://www.riegl.com/fileadmin/gallery/airborne/als_uav_lms-q160_china_2010-03.jpg (página consultada no dia 30 de junho de 2012)

Efetuar-se-á, então, uma descrição de funcionamento de cada um dos instrumentos utilizados, o que permitirá compreender melhor o funcionamento conjunto dos mesmos na breve exposição do processo de aquisição dos dados que acontece nesta etapa.

No interior da plataforma aérea, ou acoplado a esta, encontram-se essencialmente cinco instrumentos a funcionar em conjunto (Figura 11): um sensor laser, uma unidade de deflexão/ unidade de varrimento/ scanner ótico-mecânico, um sistema de GPS diferencial (DGPS), uma *Inertial Measurement Unit* (IMU) e uma unidade de controlo e gravação. Estes instrumentos, juntamente com a plataforma constituem o segmento aéreo do ALS.

Embora seja esta a configuração de base existem algumas diferenças entre os sistemas disponíveis. Desde logo, como referem Lefsky *et al* (2002), os sistemas poderão ser bastante diferentes em função de algumas especificidades dos instrumentos, tais como: comprimento de onda, a potência, a duração e a frequência de repetição do impulso, o diâmetro do raio, o ângulo de divergência, a especificidade da unidade de deflexão e a informação armazenada para cada impulso.

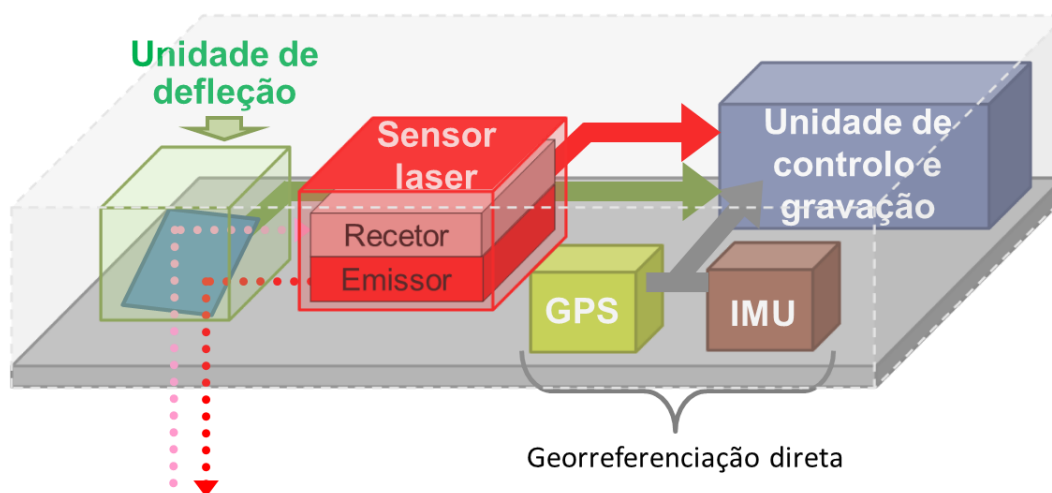


Figura 11- Instrumentos a bordo da plataforma aérea do ALS

Desta forma, as considerações que efetuaremos serão sempre realizadas numa perspetiva genérica, podendo os princípios enunciados ser aplicados à generalidade dos sistemas.

O funcionamento da tecnologia LiDAR, na atualidade, assenta, sobretudo e antes de mais, na utilização de um laser, palavra derivada do acrónimo com a mesma grafia que designa a expressão anglo-saxónica *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Não desenvolvendo muito a questão, nas palavras de Lemmens (2011) um laser é um instrumento que cria um estreito e intenso feixe de luz coerente e monocromática, gerado por partículas que emitem radiação.

A geração da luz do laser (Figura 12) ocorre pela aplicação de energia a um material (gasoso ou sólido). Quando o material retorna ao seu estado normal liberta luz coerente, que,

antes da libertação, é intensificada pela reflexão em superfícies refletoras (Heritage e Large, 2009; Campbell e Wynne, 2011).

A utilização do laser no LiDAR e, obviamente, no ALS, assenta, essencialmente, na sua capacidade de medir distâncias. Na utilização do laser para efetuar a medição dessas distâncias são utilizados dois tipos de métodos: o do impulso (*pulsed laser*) e o da diferença da fase (*phase difference*). O método da diferença de fase é utilizado com uma emissão contínua de luz, pelo que os seus lasers são chamados de *continuous wave* (CW) (Wehr e Lohr, 1999).

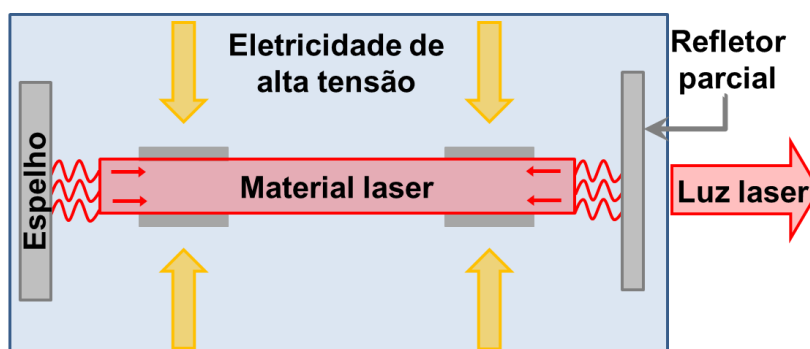


Figura 12- Diagrama esquemático de um laser simples (Adaptado de Campbell e Wynne, 2011)

Na generalidade dos casos, o ALS utiliza lasers de impulso produzidos a partir de laser semicondutores ou no estado sólido. Neste último caso, sobretudo do tipo Nd:YAG¹⁴, que produzem um feixe de luz de grande potência (Wehr e Lohr, 1999; Wehr, 2008a). Em termos comerciais é utilizado apenas um laser CW, desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa ScaLARS, pelo *Institute of Navigation* da Universidade de Estugarda (Wehr e Lohr, 1999; Mandlbürger *et al.*, 2007; Wehr, 2008a), pelo que as referências a este tipo serão menores do que aos primeiros.

Sem entrar em pormenores sobre as vantagens e desvantagens dos dois tipos de laser, segundo Wehr e Lohr (1999), a maior abundância de lasers de impulso deve-se ao facto de estes tipos de laser com elevada energia estarem facilmente disponíveis no mercado, enquanto os laser semicondutores utilizados no método de diferença de fase, com as capacidades necessárias, são muito difíceis de encontrar. Também Wehr (2008a) refere que a utilização limitada destes sistemas se fica a dever ao facto de os CW necessitarem de pelo menos três frequências e não serem atualmente muito procurados dados com rigor superior a 5 cm, limite que apenas estes conseguem alcançar.

Ao nível do comprimento de onda (Figura 13), verifica-se uma utilização que varia do ultravioleta ao infravermelho (Heritage e Large, 2009). É mais comum, contudo, a utilização dos comprimentos de onda do visível e do infravermelho (Campbell e Wynne, 2011).

¹⁴ Nd:YAG = *NeoDymium-doped Yttrium Aluminium Garnet* (dopado com NeoDímio Ítrio Alumínio Granada); Nd:Y3Al5O12

Nas aplicações terrestres são utilizados comprimentos de onda entre 900 e 1064 nm (infravermelho), nos quais a refletância da vegetação é maior, em contraposição com as partes visíveis do espectro em que a absorção da radiação é muito elevada e apenas uma pequena quantidade de energia é devolvida ao sensor (Lefsky *et al.*, 2002; Heritage e Large, 2009; Campbell e Wynne, 2011).

Em alguns casos específicos são usados comprimentos de onda diferentes, como no *Airborne Lidar Batimetry*, em que é utilizado o comprimento de onda de 532 nm (correspondente ao verde), para que se verifique uma melhor penetração na água. (Lefsky *et al.*, 2002; Campbell e Wynne, 2011)

Danson *et al.* (2009), comparando os comprimentos mais utilizados pelos sistemas atuais com aplicações terrestres, referem que os sistemas Optech, TopoSys¹⁵ Falcon e Riegle usam diferentes comprimentos de onda, respetivamente de 1064 nm, 1560 nm e 900 nm. O primeiro, obtido a partir de lasers de estado sólido Nd:YAG e os restantes a partir de lasers semicondutores (Wehr, 2008a). Na maioria dos casos é utilizado o comprimento de onda dos 1064 nm (infravermelho próximo) (Wehr e Lohr, 1999).

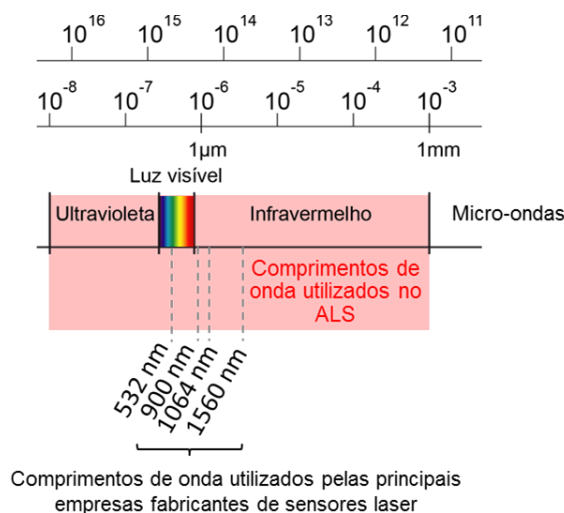


Figura 13- Comprimentos de onda mais utilizados em ALS

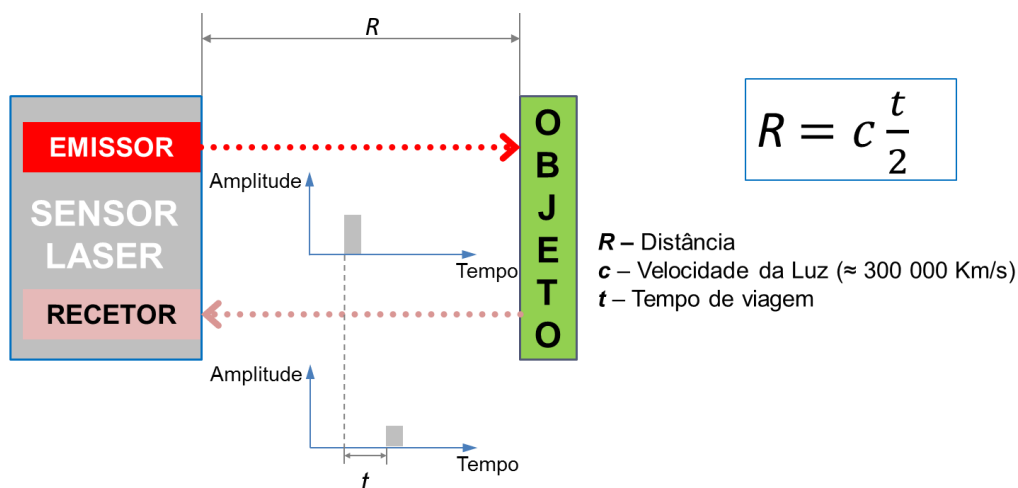


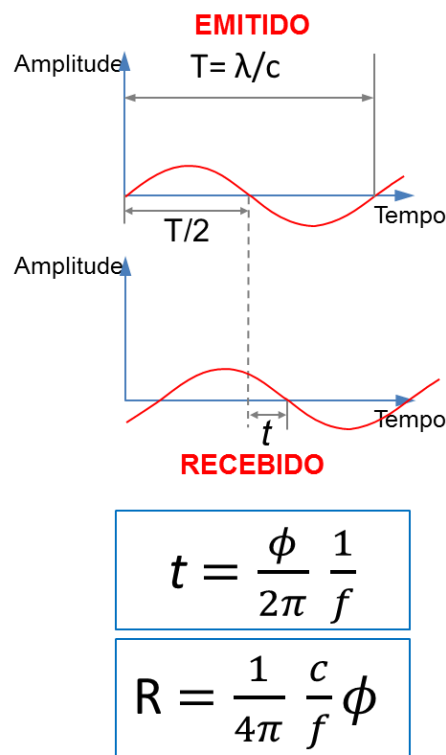
Figura 14- Funcionamento básico do sensor laser. (Alterado de Wehr e Lohr, 1999)

O contributo do sensor laser usa princípios bastante simples, seguindo os pressupostos de qualquer outro laser usado para aferir distâncias (Figura 14). O impulso emitido pelo laser viaja

¹⁵ A empresa TopoSys foi recentemente adquirida pela empresa *Trimble aerial mapping solutions*.

até ao objeto, é refletido e recebido pelo recetor, sendo, desta forma, possível mensurar o tempo gasto pelo impulso emitido (tempo de viagem). Como a velocidade de circulação do impulso é conhecido, $\approx 300000 \text{ Km/s}$ (velocidade da luz), é fácil deduzir a distância a que se encontra o objeto mensurado (Wehr e Lohr, 1999).

No caso em que o laser transmite um sinal contínuo (CW), a medição da distância pode ser efetuada, por exemplo, através da modelação da intensidade da luz do laser num sinal sinusoidal (Figura 15). A receção do sinal enviado vai chegar com um atraso, t (tempo de viagem), à semelhança do que acontece com o laser por impulsos. No entanto, neste caso, o período do sinal (T), inversamente proporcional à sua frequência (f), é conhecido e por isso t é diretamente proporcional à diferença da fase (ϕ) entre o sinal recebido e o enviado. Determinado o tempo de viagem e a diferença de fase, a distância, R , pode ser obtida facilmente (Wehr e Lohr, 1999).



t – Tempo de viagem
 ϕ – Diferença de fase
 f – Frequência
 R – Distância
 c – Velocidade da Luz ($\approx 300\,000 \text{ Km/s}$)

Figura 15- Medição da distância utilizando um laser de sinal contínuo (CW). (Alterado de Wehr e Lohr, 1999)

A unidade de deflexão, unidade de varrimento ou *scanner*, assume grande importância, uma vez que delas vai depender grandemente, segundo Wehr e Lohr (1999), a densidade dos pontos mensurados.

O princípio de base dos diferentes tipos de mecanismos utilizados (Figura 16) é uma conceção que efetue o varrimento de forma suficientemente rápida de modo a compensar a direção de voo da plataforma aérea, conseguindo obter a densidade de pontos desejada na direção de voo (Wehr, 2008a). Pela análise da figura 16, é possível constatar que a utilização de um ou outro sistema origina uma maior ou menor densidade e diferentes padrões de recolha de dados. Os *scanners* de Palmer e os de polígono de rotação permitem velocidades de varrimento mais rápidas e como tal tendentes a obter mais dados, que os de espelho oscilante. Os primeiros apresentam um padrão de recolha de dados elíptico, enquanto os segundos, recolhem os dados em linhas paralelas de forma oblíqua à de varrimento e numa única direção (Wehr, 2008a).

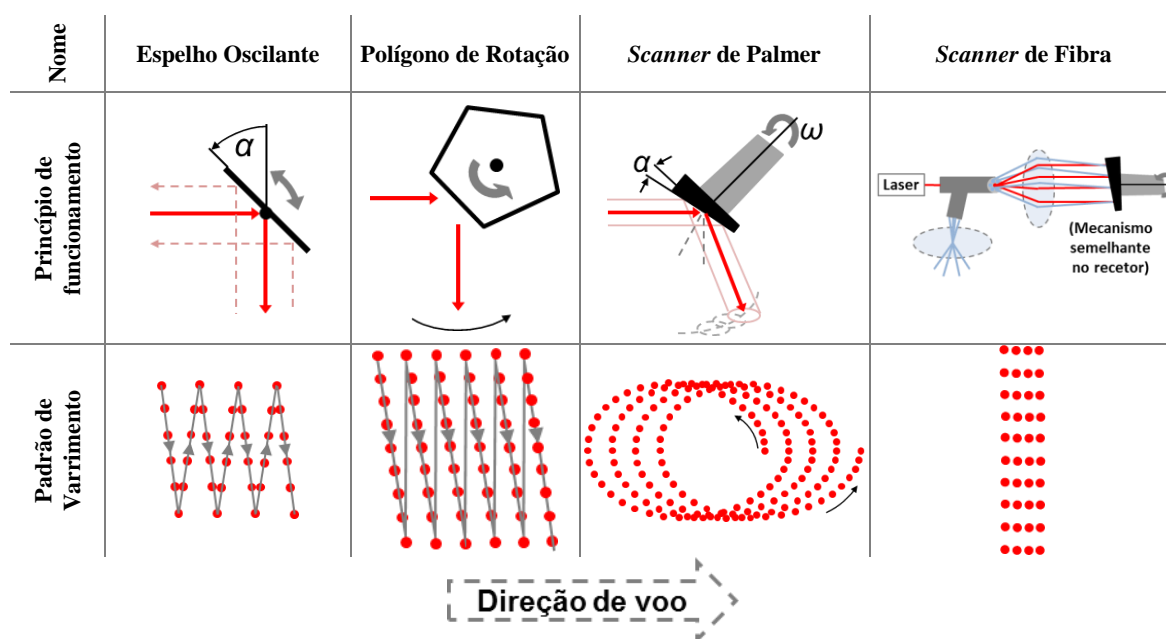


Figura 16- Características das unidades de deflexão / mecanismos de varrimento. (Adaptado de Wehr e Lohr, 1999 e Wehr, 2008)

Os *scanners* de fibra, embora procurem um padrão de levantamento equidistante (Wehr, 2008a), fornecem um padrão de levantamento de dados em linhas paralelas, com uma maior densidade de recolha ao longo da linha de voo e menor na direção de varrimento. Segundo Wehr (2008), pela sofisticação da tecnologia utilizada este tipo de sistema é apenas utilizado pela TopoSys.

Será também de referir que os padrões de varrimento na superfície terrestre estão dependentes não só das unidades de varrimento, mas também da direção e velocidade de voo, da frequência de impulsos, da topografia do terreno (Wehr e Lohr, 1999; Wehr, 2008a) e da refletância dos materiais na superfície terrestre, pelo que os padrões nem sempre apresentam as características enunciadas.

Também os pontos localizados nos extremos da faixa de varrimento apresentam características diferenciadas devido a acelerações e abrandamentos do mecanismo de varrimento e são por vezes retirados (Wehr e Lohr, 1999).

GPSTime	ScanAngle	FP_Range	LP_Range	Fpi	Lpi
139049.706219	-0.297930	780.990540	780.994934	191	191
139049.706249	-0.296926	780.840576	780.774963	187	187
139049.706279	-0.295922	780.480591	780.564941	177	177
139049.706309	-0.294751	780.340576	780.354919	192	192
139049.706339	-0.293747	780.030579	780.034912	186	186

Tabela 4- Exemplo de registos de medição da distância e dados associados a partir do ALS - ângulos em radianos e distâncias em metros (Adaptado de Devereux e Amable, 2009)

A unidade de DGPS e o IMU funcionam em conjunto, dando origem ao que é conhecido como *Position and Orientation System* (POS). Este Sistema de Posicionamento e Orientação

(Wehr e Lohr, 1999; Wehr, 2008a) permite efetuar a já referida georreferenciação direta, ou seja, a atribuição de coordenadas X, Y e Z, num sistema de coordenadas global, aos dados mensurados.

De facto, a utilização dos dois instrumentos anteriormente aludidos permite a obtenção da distância entre o sensor laser e o objeto mensurado. Contudo, para se conseguir posicionar cada uma das mediações num sistema tridimensional, será necessário associar de forma contínua a posição e orientação do sensor laser num sistema de coordenadas (Wehr e Lohr, 1999; El-Sheimy, 2008), como o WGS84, e aqui entra o POS.

Ao mesmo tempo que os dados do varrimento laser estão a ser mensurados, verifica-se a leitura permanente da posição do sensor através de um sistema DGPS em contato com a constelação de satélites GPS (que constitui o segmento espacial do ALS), permitindo obter as suas coordenadas X, Y e Z. Verifica-se também a necessidade de utilização de uma estação GPS terrestre de referência (à frente aludido) para se efetuar, *a posteriori*, a correção diferencial, pelo que a ligação permanente a esta estação não é necessária (Wehr, 2008a).

Contudo, a plataforma aérea, apresenta um comportamento dinâmico em permanente mutação caracterizado por três movimentos distintos: *roll*, *pitch* e *yaw* (Large e Heritage, 2009; Lemmens, 2011), em relação às coordenadas X, Y e Z aferidas pelo DGPS (Figura 17).



Figura 17- Comportamento dinâmico de um avião

Assim, para poderem ser atribuídas com correção coordenadas tridimensionais aos dados mensurados, verifica-se a necessidade de leitura e armazenamento do comportamento dinâmico da plataforma aérea onde se encontra o sensor laser, o que é conseguido pela utilização do IMU.

Este instrumento encontra-se posicionado o mais próximo possível do sensor laser, normalmente por cima do mesmo (Wehr, 2008a). O IMU é um instrumento composto por uma combinação de três acelerómetros e três giroscópios alinhados em conjunto, associados a uma unidade de processamento (El-Sheimy, 2008; Lemmens, 2011). Este sistema tem a capacidade

de determinar o posicionamento, através dos acelerómetros, e o comportamento dinâmico em termos angulares dos três movimentos referidos (Tabela 5), através dos giroscópios (Lemmens, 2011).

WvfTime	Roll	Pitch	Heading	Lat	Long	Elev
139049.706219	-0.009088	0.057801	-0.052701	0.915451	6.279799	789.861206
139049.706249	-0.009090	0.057801	-0.052703	0.915451	6.279799	789.861145
139049.706279	-0.009093	0.057801	-0.052704	0.915451	6.279799	789.861145
139049.706309	-0.009095	0.057801	-0.052706	0.915451	6.279799	789.861084
139049.706339	-0.009098	0.057802	-0.052707	0.915451	6.279799	789.861023

Tabela 5- Exemplo de registos da posição e do comportamento dinâmico do GPS e IMU a partir do ALS - ângulos em radianos e distâncias em metros (Adaptado de Devereux e Amable, 2009)

Sendo preponderante o seu papel na aquisição de dados sobre o comportamento dinâmico da plataforma, já que a posição é determinada pelo sistema DGPS, a sua capacidade neste último domínio não deve ser negligenciada, uma vez que esta informação poderá ser utilizada para colmatar a falta de dados do sistema DGPS, provocada pela perda de contacto com os satélites (El-Sheimy, 2008; Lemmens, 2011).

Em resumo, a utilização das coordenadas do sistema DGPS, em conjunto com os dados sobre o comportamento dinâmico da plataforma aérea, permite determinar com precisão a localização de todas as medições efetuadas pelo sensor laser num sistema de coordenadas de referência como o WGS84.

Pelo já exposto, é facilmente perceptível que neste processo existe uma enorme quantidade de dados mensurados e que existe a necessidade de não só serem armazenados, mas também sincronizados entre si para que possam fazer sentido.

Por conseguinte, a unidade de controlo e gravação assume-se como o verdadeiro cérebro do sistema (Figura 11). Esta unidade será composta por um conjunto de hardware, processador e unidades de gravação, e *software*, que, em conjunto, irão concretizar a integração dos dados dos restantes instrumentos, registando-os de forma coordenada: tempo de emissão do impulso, tempo de receção do impulso, ângulo de varrimento da unidade de deflexão, coordenadas registadas pelo sistema GPS no momento de cada uma das medições, registo horário dos registos de coordenadas, movimentos do comportamento dinâmico da plataforma (*roll*, *pitch* e *yaw*) para cada uma das medições efetuada, registo horário dos movimentos do comportamento dinâmico da plataforma, etc.

No funcionamento desta unidade é particularmente importante o registo horário, pois será com o registo efetuado por esta unidade para cada uma das medições que será possível, posteriormente, efetuar a sincronização dos dados.

Resta, pois, compreender o funcionamento conjunto da instrumentação a bordo da plataforma aérea no decorrer do levantamento.

À medida que o avião¹⁶ vai sobrevoando a área de levantamento de dados (Figura 18), o sensor laser¹⁷, vai continuamente emitindo impulsos, numa frequência que poderá atingir os 300000¹⁸ impulsos por segundo (Campbell e Wynne, 2011). Todos os impulsos são defletidos na unidade de deflexão e enviados na direção da superfície terrestre, donde, ao encontrarem um objeto (a própria superfície terrestre ou um objeto sobre si), serão refletidos e devolvidos à unidade de deflexão e, desta, enviados para o sensor laser, cujo recetor mede e regista o tempo que medeia entre a emissão e a receção do eco do impulso inicial, canalizando estes dados para a unidade de controlo e gravação.

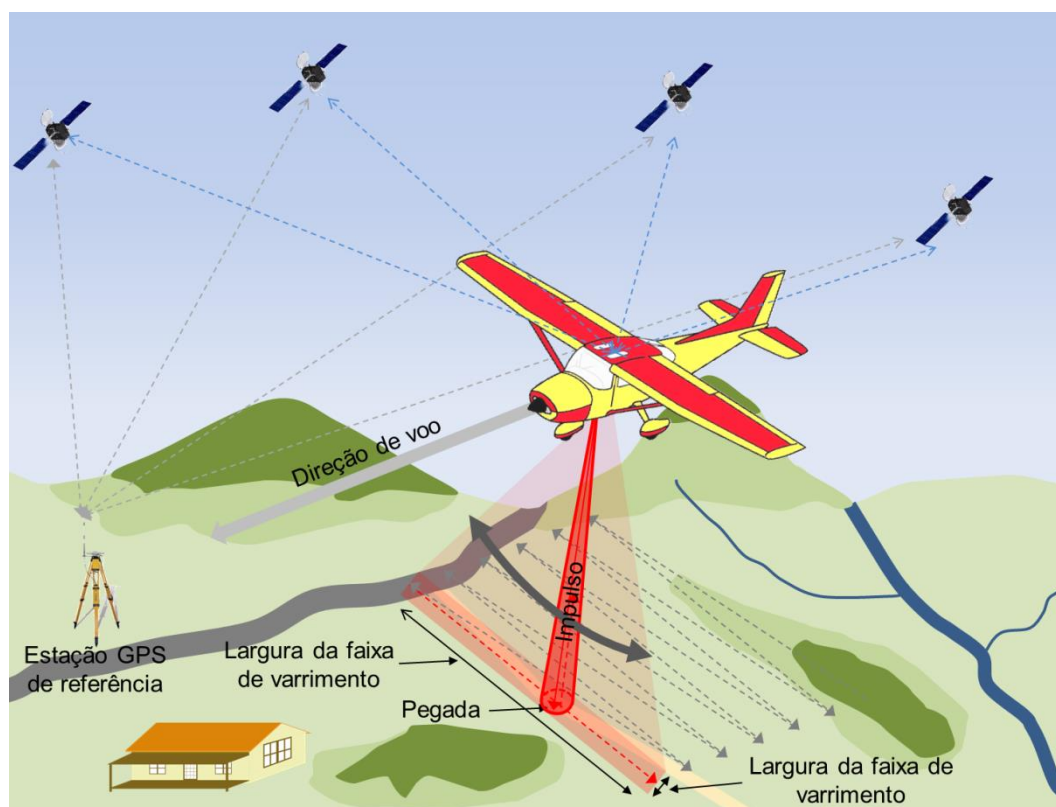


Figura 18- Processo de aquisição de dados do ALS

À emissão dos impulsos, acresce a movimentação da unidade de deflexão que dá origem a um movimento de varrimento e a uma consequente faixa de varrimento sobre a superfície terrestre, perpendicular à direção de voo.

Em simultâneo com este processo, e de forma contínua e coordenada, encontram-se a funcionar os componentes do POS, a unidade de GPS e o IMU e só pela ação destes é que o

¹⁶ Embora se utilize na descrição o avião, os mesmos princípios são extensíveis aos restantes tipos de plataformas aéreas.

¹⁷ Utiliza-se na descrição o sistema de laser por impulsos, por ser, como referido, o mais comum. No entanto, os princípios de base são extensíveis aos sistemas de diferença de fase que utilizam lasers de onda contínua.

¹⁸ Os valores de referência em relação à quantidade de impulsos emitidos por segundo não são consensuais. Nalguns casos, o diacronismo de publicação justifica a diferença, pois a tecnologia tem revelado desenvolvimentos, pelo que se tem verificado um aumento do número de impulsos emitidos por segundo. Noutros casos, verificam-se diferenças em publicações recentes e do mesmo ano, como é o caso de Lemmens (2011) e Campbell e Wynne (2011), uma vez que o primeiro refere o valor de até 250000 e o segundo até 300000 impulsos por segundo.

sistema funciona (Wehr e Lohr, 1999). Desta forma, como abordado, os dados armazenados na unidade de controlo e gravação vão permitir efetuar a georreferenciação direta de todas as medições efetuadas e, assim colocá-las num sistema de coordenadas tridimensional de referência.

Contudo, para que o processo de georreferenciação de dados seja eficaz, será necessária a utilização do segmento terrestre do ALS, que é constituído por uma estação GPS terrestre de referência (Large e Heritage, 2009). Esta estação de referência, localizada num ponto com coordenadas conhecidas e a uma distância não superior a 25 km da plataforma aérea (Wehr, 2008a), irá medir e armazenar em contínuo os dados GPS, permitindo, posteriormente, efetuar a correção diferencial dos dados recolhidos pela unidade de DGPS a partir do avião, eliminando, desta forma, um conjunto de erros habituais, como atrasos na ionosfera e troposfera, erros do relógio do recetor e erros orbitais (Lemmens, 2011), aumentando, deste modo, o rigor do posicionamento de cada uma das medições efetuadas no avião.

Será de notar que cada impulso é constituído por um feixe de luz, com um correspondente diâmetro. O diâmetro com que o feixe de luz atinge a superfície terrestre é variável e dependente de vários fatores. Este diâmetro constitui o que é conhecido como pegada e, a uma altitude de 1000 metros, apresenta valores típicos entre 20/30 cm e 1/1,1 m (Wehr, 2008a; Lemmens, 2011).

Contudo, o diâmetro da pegada varia consoante a altitude da plataforma e a divergência do feixe de luz (Figura 19), que, por sua vez, está dependente da abertura do emissor laser e do comprimento de onda (Wehr, 2008a; Danson *et al.*, 2009). Segundo Wehr (2008a), uma boa estimativa da pegada mínima possível é obtida através do cálculo do limite de difração do feixe de luz. Para luz coerente num determinado comprimento de onda (λ), a divergência do feixe de luz é:

$$\omega = 2,44 \frac{\lambda}{D}$$

onde D corresponde ao diâmetro de abertura. Assim, o diâmetro d correspondente à superfície iluminada no solo é:

$$d = D + \frac{\lambda}{D} \times R = D + \omega \times R$$

onde R é a distância de medição. Como D é pequeno comparado com o segundo termo, uma boa aproximação da pegada d é:

$$d = \omega \times R$$

Na posição de nadir corresponde à altitude de voo, porque R é igual à altura de voo.

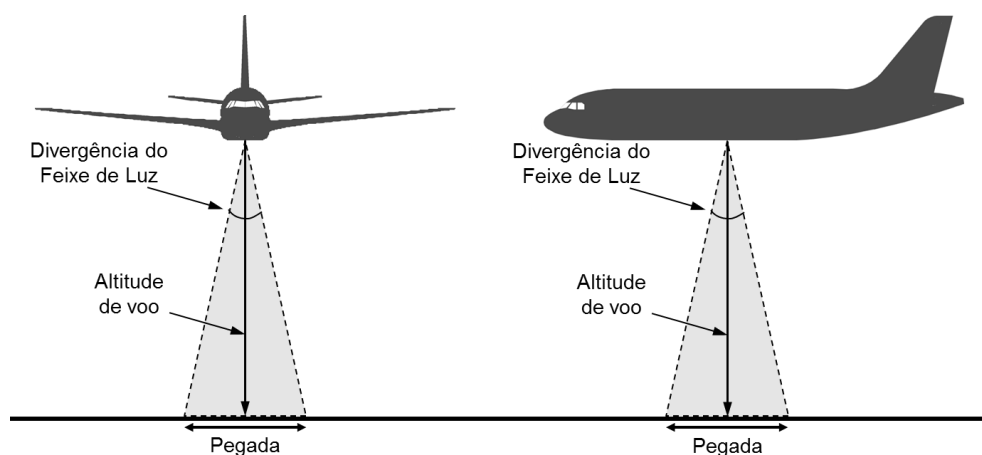


Figura 19- Características da pegada.

Assim, a relação entre a divergência do feixe de luz e a pegada pode ser expressa de forma simples. A uma altitude de 1000 m, uma divergência do feixe de luz de 0,2 mrad¹⁹ equivale a uma pegada de 0,2 m. A 2000 m o tamanho da pegada duplica, variando linearmente com o aumento da altitude (Lemmens, 2011).

Se tivermos em consideração que os sistemas comerciais atuais variam entre 0,2 e 11 mrad (Lemmens, 2011), as pegadas a uma altitude de 1000 m variam entre 0,2 m e 11 m.

Os sistemas que possuem uma pegada de até 1 m são conhecidos como sistema de pegada pequena (*small footprint systems*), enquanto os sistemas que utilizam pegadas entre 10 e 100 metros são habitualmente referidos como sistemas de pegada grande (*large footprint systems*) (Harding, 2008; Devereux e Amable, 2009).

A utilização de um ou de outro sistema depende do objetivo final. Contudo, são reconhecidas as diferentes capacidades dos dois tipos de sistema para penetrarem a vegetação e, como tal, obterem leituras da superfície. Danson *et al.* (2009) referem que quanto menor for a pegada, maior probabilidade existirá de não se receberem retornos da superfície, mas sim dos objetos que se encontram à sua superfície.

Já Lemmens (2011) salienta a importância da divergência do feixe da luz na produção da pegada, referindo que deste depende o nível de penetração em áreas de floresta e noutras áreas com vegetação, o nível de detalhe obtido e o rigor de determinação das formas dos edifícios e outros objetos.

Desta forma, os sistemas de pegada grande são mais apropriados para áreas com vegetação, enquanto os restantes serão mais apropriados para situações em que não exista cobertura vegetal e se necessite de um grande rigor, especialmente na medição da altitude, como a cartografia de áreas de inundação (Mather, 2004).

¹⁹ mrad – Miliradianos, subunidade do radiano (1/1000 radianos).

O diâmetro da pegada determina, simultaneamente, a largura da faixa de varrimento na direção de voo, enquanto na direção perpendicular à da direção de voo, *Field Of View* (FOV), a faixa de varrimento é determinada pelo ângulo máximo do mecanismo de deflexão e pela altitude de voo da plataforma (Figura 20) (Wehr, 2008a).

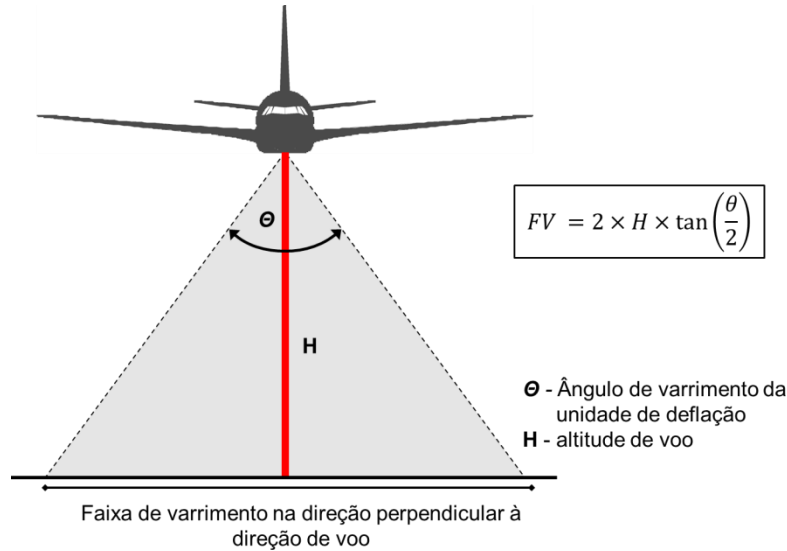


Figura 20- Faixa de varrimento na direção perpendicular à direção de voo.

O valor usual do ângulo de varrimento da unidade de deflexão é, segundo Harding (2008), de 30°, pelo que a uma altitude de 1000 metros a largura da faixa de varrimento será de 535,9 m.

Alguns dos aspetos anteriormente enunciados relacionam-se, de certa forma, com a densidade de retornos mensurados. Esta densidade é usualmente tida como a resolução do levantamento (Devereux e Amable, 2009), podendo ser equiparada à resolução dos sensores de imagem passivos (Danson *et al.*, 2009)

Este aspeto é de extrema importância, pois, quanto maior for a densidade de retornos, mais precisos e rigorosos serão os produtos gerados, embora diferentes densidades permitam trabalhar com diferentes objetivos. Se o objetivo for a identificação de edifícios, um ou dois retornos por metro quadrado serão suficientes. Contudo, se o objetivo for a identificação de linhas de alta tensão serão necessários valores de 10 retornos por metro quadrado (Danson *et al.*, 2009).

A densidade dos pontos é determinada pelo movimento da plataforma, pela frequência de emissão dos impulsos laser, pela velocidade de varrimento (movimento da unidade de deflexão), pela altitude da plataforma (Wehr, 2008a; Devereux e Amable, 2009) e pelo ângulo de varrimento da unidade de deflexão (Wehr, 2008a). Na direção de voo são importantes a velocidade da plataforma (v) e a velocidade da unidade de deflexão (f_{vud}) e é determinada por:

$$Densidade\ longo = \frac{v}{f_{vud}}$$

enquanto na direção perpendicular à direção de voo são importantes a frequência de emissão de impulsos ($f_{impulsos}$), a altitude da plataforma (H) e o ângulo de varrimento da unidade de deflexão (θ), sendo determinada por:

$$Densidade\ perpendicular = \frac{\theta}{N} \times \frac{H}{\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

em que N corresponde a:

$$N = \frac{f_{impulsos}}{f_{vud}}$$

Um aspeto extremamente importante, que constitui um aspeto fundamental e valorativo do ALS, constituindo-se como um fator responsável pelo aumento do número de medições efetuadas, prende-se com a capacidade de os sistemas efetuarem várias medições a partir de um único impulso. Ou seja, os sistemas ALS de impulso são capazes de armazenar até cinco retornos por cada impulso emitido (Figura 21) (Wehr e Lohr, 1999; Harding, 2008; Large e Heritage, 2009; Starek *et al.*, 2009; van Leeuwen e Nieuwenhuis, 2010). Dada esta característica, estes sistemas são conhecidos como *discrete-return* (Lefsky *et al.*, 2002; Harding, 2008; Devereux e Amable, 2009;

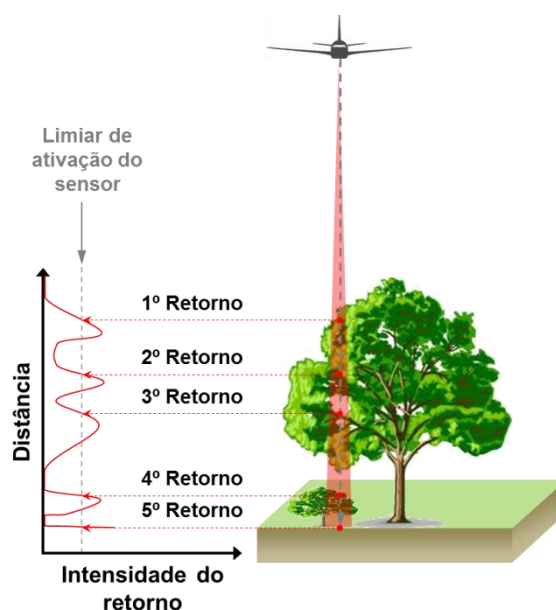


Figura 21- Retornos múltiplos obtidos a partir do ALS.

Evans *et al.*, 2009; Starek *et al.*, 2009) em oposição aos já referidos CW (*Continuous Wave*) ou *full-waveform*, através dos quais é mensurada de forma contínua a variação da intensidade da energia dos retornos à medida que é recebida (Lefsky *et al.*, 2002; Pfeifer e Briese, 2007a; van Leeuwen e Nieuwenhuis, 2010).

A gravação de retornos múltiplos a partir de uma única pegada apresenta uma enorme utilidade, permitindo a identificação de diferentes objetos à superfície da terra, como árvores ou construções humanas.

Uma vez que cada impulso é constituído por uma pegada de diâmetro variável é facilmente perceptível que uma parte do impulso apresenta a possibilidade de penetrar na vegetação e alcançar o solo, constituindo a última reflexão do impulso emitido. Dedução semelhante pode ser efetuada, por exemplo, para uma habitação, onde uma parte do impulso emitido é refletido no telhado da habitação e outra no chão ao seu lado (Figura 22).

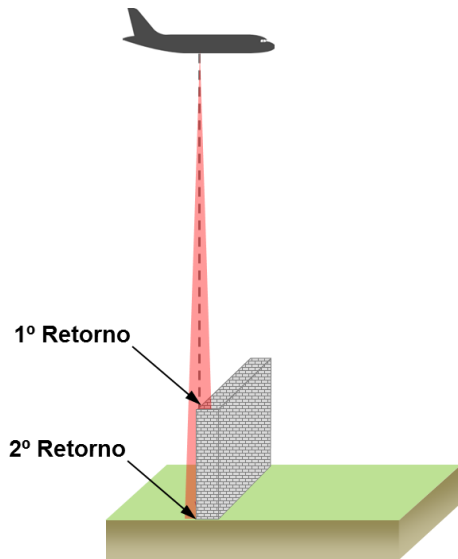


Figura 22- Retornos múltiplos numa construção humana (muro)

Obviamente, tal não é uma verdade absoluta, pelo que esta enorme potencialidade apresenta limitações. O número de retornos detetados por impulso depende da distribuição das superfícies mensuradas e da sua refletância ao comprimento de onda utilizado pelo laser (Harding, 2008).

Os múltiplos impulsos serão detetados sempre que a área e a refletância da superfície iluminada pelo impulso estejam acima do limiar de ativação do recetor. O primeiro retorno (Figura 23), no caso da vegetação, pode corresponder ao topo de uma árvore, a uma parte a meio da árvore, ou ao solo. Da mesma forma, o último retorno pode corresponder ao solo, como pode ser um patamar intermédio da vegetação. A identificação de retornos correspondentes ao solo em áreas cobertas por vegetação, depende da densidade da vegetação, do ângulo de leitura, do ângulo de divergência do sensor laser, da distância a que é efetuada a medição, da densidade das medições e da refletância do solo (Harding, 2008).

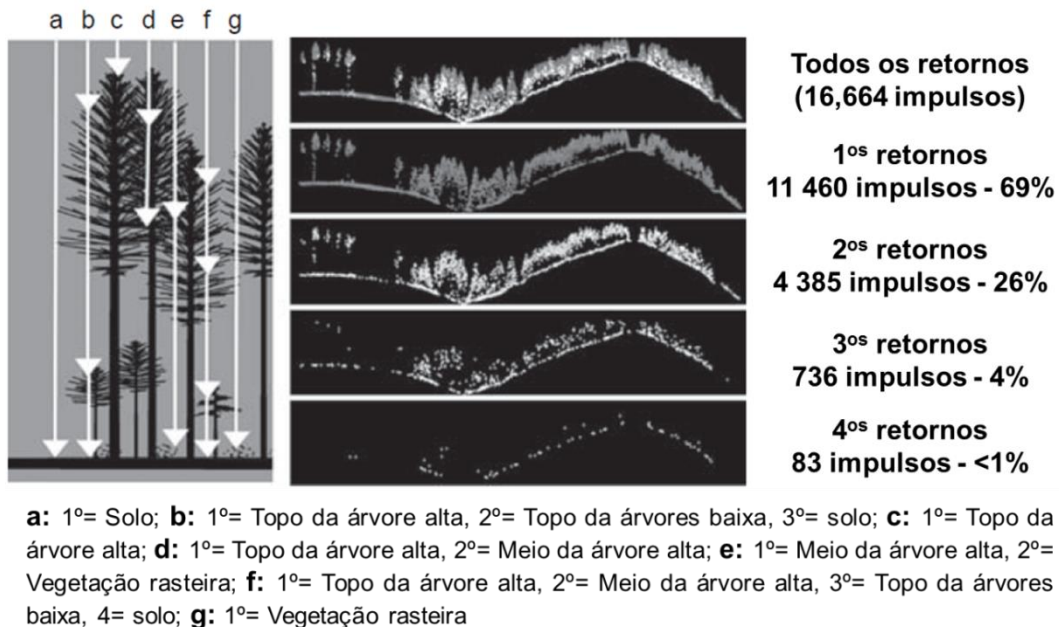


Figura 23- Funcionamento dos retornos numa área com vegetação. (Adaptado de Harding, 2008)

Assim sendo, abre-se a possibilidade de manipular a informação obtida possibilitando a obtenção de dados altimétricos sobre a superfície, Modelos Digitais de Terreno (MDT). Estes modelos podem utilizar o primeiro retorno mensurado, dando origem a um Modelo Digital de Superfície (MDS), ou podem utilizar o último retorno, correspondente ao solo após filtragem, dando origem a um Modelo Digital de Elevação (MDE).

De referir ainda que, na atualidade, além dos instrumentos referidos, é comum a inclusão de câmaras fotográficas digitais e outros aparelhos de medição (Lemmens, 2011), cuja informação associada aos dados ALS se assume como uma grande mais-valia e parte intensiva do processo de investigação na atualidade.

3.3.1.2. O pós-processamento

Após a aquisição da inúmera quantidade de dados, descrita anteriormente, torna-se fundamental efetuar o seu processamento, convertendo-os em dados manipuláveis (e, por vezes, produtos) passíveis de serem usados por utilizadores finais, de acordo com os seus objetivos.

Este processo passa obviamente, pelo cruzamento de todos os dados obtidos, não existindo, segundo Wehr (2008a), uma metodologia padrão de procedimentos, especialmente porque os instrumentos do sensor LiDAR e do Sistema de Posicionamento e Orientação (GPS e IMU) são provenientes de fabricantes diferentes. No entanto, os princípios de base são semelhantes e encontram-se patentes na figura 24.

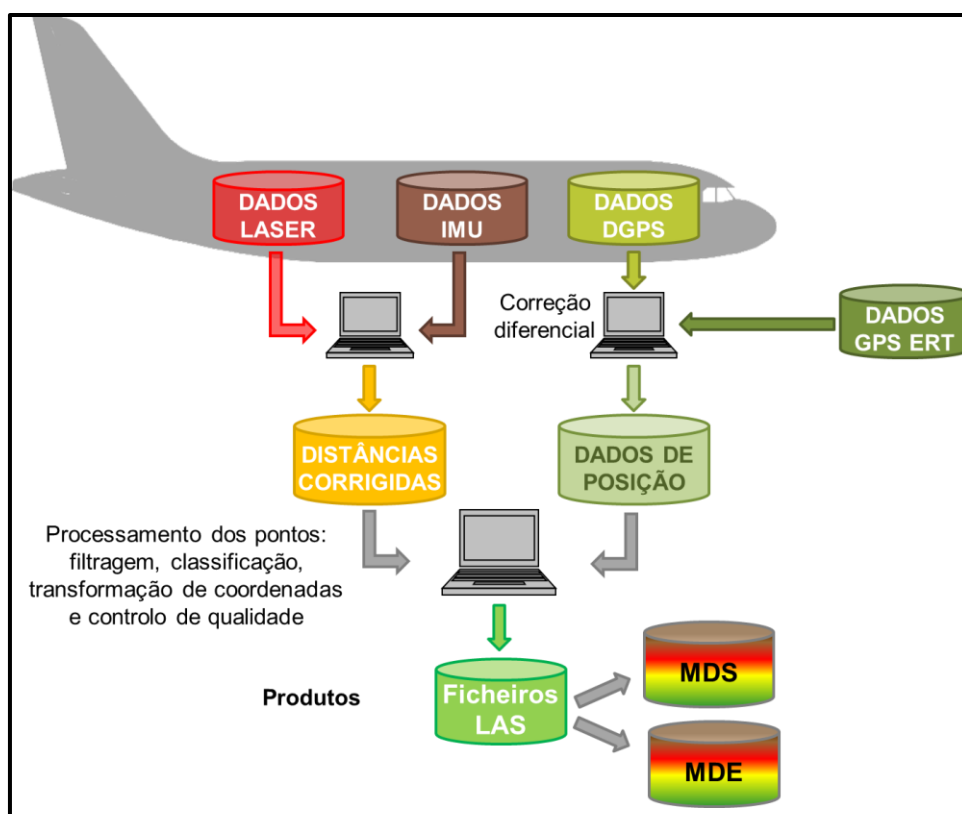


Figura 24- Passos do processo de pós-processamento dos dados ALS.

O objetivo principal nesta etapa é gerar pontos com coordenadas tridimensionais para cada um dos retornos mensurados, ou seja a integração dos dados do sensor LiDAR com os do Sistema de Posicionamento e Orientação, pelo que a parte inicial do processo terá de se prender com este processo de georreferenciação. Todavia, deve considerar-se que, segundo Lemmens

(2011), existem métodos para a integração destes dados de forma direta no decorrer do levantamento, com uma precisão superior ao decímetro.

Numa primeira fase, são processados conjuntamente os dados provenientes da unidade de DGPS e da estação GPS de referência, de forma a proceder à correção diferencial dos dados referentes ao posicionamento, permitindo a obtenção dados com rigor superior ao cm (Wehr, 2008a).

Após o cálculo das distâncias entre a plataforma aérea e o solo, para todas as medições efetuadas, tendo em consideração o ângulo da unidade de deflexão, os dados são corrigidos, utilizando os dados armazenados pelo IMU, referentes ao posicionamento da aeronave (*roll*, *pitch* e *yaw*), obtendo-se os valores das distâncias corrigidas (Burtch, 2002).

Após a realização dos dois passos anteriores, os dados resultantes são cruzados, dando origem ao posicionamento tridimensional final dos pontos obtidos.

Neste momento do processo, todos os pontos se encontram corretamente georreferenciados, seguindo-se os procedimentos de filtragem dos mesmos, ou seja, a eliminação dos pontos que apresentem incorreções – tais como os que se localizam nos extremos das faixas de varrimentos – ou a eliminação de pontos que sejam desnecessários para o objetivo final. Também nesta fase, se procede à classificação dos pontos, identificando-se a que tipo de objeto se refere cada um dos pontos. Habitualmente, procede-se também à transformação dos sistemas de coordenadas do sistema WGS84 para um sistema de referência solicitado pelo cliente e efetuam-se procedimentos de controlo de qualidade que validam a informação obtida.

O produto final será um ficheiro ou um conjunto de ficheiros, situação mais comum, dependendo da extensão da área levantada. Frequentemente, os ficheiros fornecidos aos clientes são acompanhados por ficheiros com Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais de Elevação (MDE).

3.3.2. Os ficheiros LAS e as nuvens de pontos

O principal produto final fornecido aos clientes são ficheiros de dados com informações referentes aos pontos mensurados. Estes ficheiros armazenam dezenas ou centenas de milhões de pontos (Isenburg, s.d.) e os seus atributos, originando ficheiros de dimensões consideráveis que causam constrangimentos na sua utilização.

Tradicionalmente, a informação referente à localização de pontos no espaço, ou seja, a que contem coordenadas X, Y e Z, era armazenada em formatos binários proprietários ou ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) (Graham, 2008; Isenburg, s.d.).

Inicialmente, as diferentes empresas desenvolveram os seus formatos proprietários (Graham, 2008). Contudo, dada a falta de interoperacionalidade destes tipos de ficheiros, a troca de informação entre diferentes sistemas era feito com o recurso ao formato ASCII (Graham,

2008; Isenburg, s.d.). Mas mesmo este formato levantava problemas. Primeiro, devido ao grande tamanho dos ficheiros produzidos, em segundo lugar, porque este formato não permite a realização de operações numéricas diretas (Graham, 2008; Isenburg, s.d.) e, em terceiro lugar, porque são perdidos os dados brutos derivados da aquisição (ASPRS, s.d.).

Tendo em consideração que os sistemas de processamento de elevada capacidade precisavam de integrar *hardware* e *software* de diferentes proprietários, foi criado em 2002, de forma espontânea um comité informal de trabalho com representantes das principais empresas – Z/I Imaging Corporation, EnerQuest, Optech Corporation, Leica Geosystems e o U.S. Army Corps of Engineers Topographic Engineering Center (TEC) – com o objetivo de desenvolver um formato *standard* de dados LiDAR (Graham, 2008).

A solução veio de um formato já desenvolvido pela EnerQuest em colaboração com o TEC. Este formato, chamado de LAS (de LASer), era um formato binário independente do *hardware* e foi doado ao domínio público (Graham, 2008).

Assim, após algumas pequenas modificações por parte da American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), a versão 1.0 do formato LAS foi aprovada em março de 2003 (Graham, 2008), estando, desde 14 de novembro de 2011 na versão 1.4- R11, retificado pela revisão 12 de 10 de Junho de 2012.

Um ficheiro LAS, ao contrário dos formatos de dados convencionais, fornece geralmente uma quantidade significativa de características do sensor ao *software* que o utiliza (Graham, 2008) e um conjunto de atributos associados a cada um dos pontos.

Os ficheiros LAS são constituídos por um cabeçalho que pode ser seguido de registos de comprimento variável²⁰ até o início dos registos de dados e pode, de seguida, conter registos de comprimento variável alargados²¹ (ASPRS, 2012).

Os primeiros *bytes* do ficheiro constituem o cabeçalho (Figura 25), que define o conteúdo do ficheiro, apresentando diferentes tipos de informação como o número de registos de comprimento variável, o *offset* ao ponto inicial, o formato de armazenamento de dados, o tamanho de armazenamento de cada ponto, o número de registos de pontos, o número de registos de pontos por retorno, os fatores de offset e escala, valores mínimos e máximos X, Y e Z dos pontos do ficheiro, entre outros.

Nos formatos 1.3 e 1.4, em que cada ponto pode estar associado a uma onda, característica dos sistemas CW, o cabeçalho pode conter 235 *bytes*, estando os 8 *bytes* extra associados a informação relacionada com o início dos dados da onda.

Nestes casos, se o campo for 0, a onda é armazenada num ficheiro externo, se o campo não for 0, a onda é gravada no ficheiro LAS (Isenburg, s.d.).

²⁰ Traduzido de *Variable Length Records* (VLRs)

²¹ Traduzido de *Extended Variable Length Records* (EVLRs)

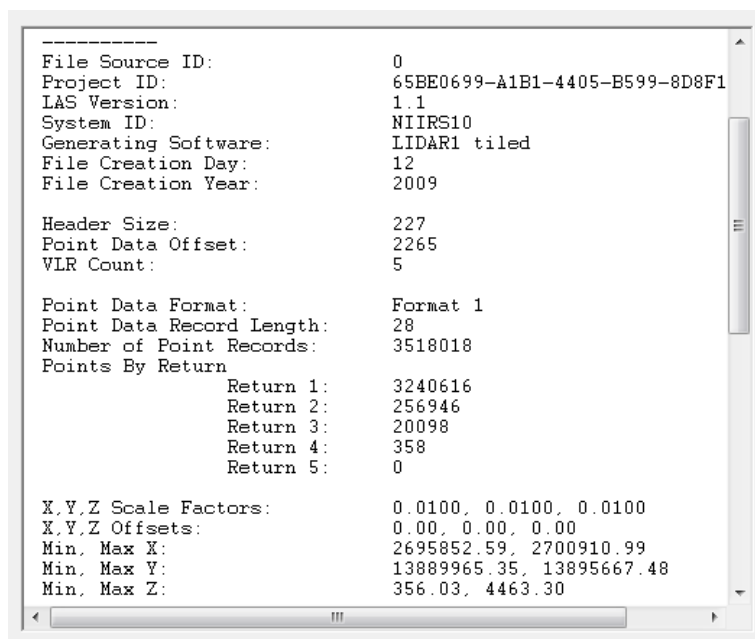


Figura 25- Exemplo de cabeçalho de um ficheiro LAS.

Os registos de comprimento variável contêm dados diversos, incluindo informação sobre a projeção, metadados e dados do utilizador, estando limitados a 65535 bytes (ASPRS, 2012).

Já os registos de comprimento variável alargados proporcionam uma maior capacidade em relação aos anteriores, com a vantagem de serem um apêndice ao ficheiro, o que permite acrescentar informação sem ter de se reescrever a totalidade do ficheiro (ASPRS, 2012).

O armazenamento dos pontos pode ser feito em 11 formatos diferentes (Tabela 6), do 0 ao 10, cujas diferenças residem, sobretudo, na existência cumulativa de mais atributos para armazenar informações particulares de levantamentos efetuados com diferentes objetivos e instrumentos e na maior capacidade de armazenar informação de uns formatos em relação a outros.

As diferenças entre os formatos 0-5 e 6-10 prendem-se, além da existência de mais alguns atributos, essencialmente, com a maior capacidade de armazenamento dos dados. Note-se que formato 0 apresenta o limite de 20 *bytes* por registo, enquanto o formato 6 se encontra limitado a 30 *bytes*.

Esta diferença prende-se com a possibilidade de os últimos cinco formatos armazenarem até 15 retornos por impulso, de classificarem os pontos em 256 classes e de possuírem uma maior precisão no ângulo de varrimento e do tempo do GPS passar a ser obrigatório.

Com isto, é facilmente perceptível que a transformação dos ficheiros para o formato X, Y e Z em formato ASCII conduz a uma grande perda de informação, ficando toda a informação crítica para a classificação dos pontos perdida (Graham, 2008).

ATRIBUTO	Tipo de dados		Tamanho		Formato										
	0-5	6-10	0-5	6-10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	long	long	4 bytes	4 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Y	long	long	4 bytes	4 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Z	long	long	4 bytes	4 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Intensity	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Return Number	3 bits (bit 0 – 2)	4 bits (bit 0 – 3)	3 bit	4 bits	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Number of Returns	3 bits (bit 3 – 5)	4 bits (bit 4 – 7)	3 bit	4 bits	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit (bit 6)	1 bit	1 bit	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit (bit 7)	1 bit	1 bit	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Classification	unsigned char	unsigned char	1 bytes	1 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Scan Angle Rank	char	short	1 bytes	2 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
User Data	unsigned char	unsigned char	1 bytes	1 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Point Source ID	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GPS Time	double	double	8 bytes	8 bytes		X		X	X	X	X	X	X	X	X
Red	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes			X	X		X		X	X		X
Green	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes			X	X		X		X	X		X
Blue	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes			X	X		X		X	X		X
Wave Packet Descriptor Index	unsigned char	unsigned char	1 bytes	1 bytes					X	X				X	X
Byte offset to waveform data	unsigned long	unsigned long	8 bytes	8 bytes					X	X				X	X
Waveform packet size in bytes	unsigned long	unsigned long	4 bytes	4 bytes					X	X				X	X
Return Point Waveform Location	float	float	4 bytes	4 bytes					X	X				X	X
X(t)	-	float	4 bytes	4 bytes					X	X				X	X
Y(t)	-	float	4 bytes	4 bytes					X	X				X	X
Z(t)	-	float	4 bytes	4 bytes					X	X				X	X
Classification Flags	-	4 bits (bits 0 - 3)	-	4 bits							X	X	X	X	X
Scanner Channel	-	2 bits (bits 4 - 5)	-	2 bits							X	X	X	X	X
NIR	-	unsigned short	-	4 bytes									X		X

Tabela 6- Atributos dos ficheiros LAS e formatos de gravação²²

Um exemplo de ficheiro LAS pode ser visto na figura 26.

X	Y	Z	INTENS	RET_NUMB	NUM_RET	SCAN_DIR	EDGE_FLI	CLASS	SCAN_ANG	FILE_MAR	USER_BIT	GPS
509478,01	4659813,67	254,21	104	1	1	1	0	1	7	0	14	135473,4592
509477,32	4659813,67	254,11	111	1	1	1	0	2	7	0	14	135473,4592
509476,65	4659813,67	254,23	104	1	1	1	0	2	7	0	14	135473,4592
509476	4659813,66	254,5	98	1	1	1	0	1	7	0	14	135473,4592
509475,3	4659813,66	254,43	117	1	1	1	0	2	7	0	14	135473,4592
509474,68	4659813,65	254,77	107	1	1	1	0	1	7	0	14	135473,4592
509474,04	4659813,64	255,08	92	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4592
509473,43	4659813,64	255,42	91	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4592
509472,76	4659813,63	255,58	103	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4593
509472,02	4659813,64	255,24	112	1	1	1	0	2	8	0	14	135473,4593
509471,4	4659813,63	255,64	101	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4593
509470,73	4659813,63	255,65	123	1	1	1	0	2	8	0	14	135473,4593
509470,11	4659813,62	256,08	88	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4593
509469,42	4659813,62	256,02	90	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4593
509468,78	4659813,61	256,18	111	1	1	1	0	1	8	0	14	135473,4593

Figura 26- Exemplo de um ficheiro LAS

²² Mais informação acerca do significado dos atributos pode ser obtida pela consulta da tabela 40 em Anexo 2.

O levantamento de dados através do ALS, mesmo que de uma pequena área, origina uma grande quantidade de pontos mensurados, dezenas ou centenas de milhões. Dados os atributos associados a estes pontos, o tamanho dos ficheiros gerados é considerável, mesmo que um levantamento seja dividido em vários ficheiros, constituindo um mosaico de ficheiros, como normalmente acontece.

Esta situação representa um problema em termos de operacionalidade, já que levanta dificuldades de processamento ao *hardware* e *softwares* utilizados e entraves ao armazenamento e troca de ficheiros. Adiciona-se a este problema o aumento crescente da densidade de pontos o que leva à ampliação do tamanho dos ficheiros (Isenburg, s.d.).

Será de notar que a situação é agravada com a transformação dos ficheiros LAS em formato ASCII, como já foi referido.

Verificou-se, por isso, a procura de soluções que permitam responder à totalidade ou pelo menos a parte destes problemas. Um avanço significativo foi dado por Isenburg (s.d.) ao desenvolver o LASzip como parte integrante do pacote de *software* LAStools, sobre uma licença LGPL. Trata-se de um *software* de compressão de ficheiros LAS, com velocidade de compressão e descompressão de cerca de três milhões de pontos por segundo e que gera ficheiros comprimidos com 7 a 25% do tamanho original (Isenburg, s.d.).

Compreendida a estrutura dos ficheiros, para a generalidade dos seus utilizadores finais, cabe salientar dois campos: o da intensidade (*Intensity*) e, especialmente, o da classificação (*Classification*), que se relaciona com os procedimentos de pós-processamento já referidos.

O atributo intensidade representa a magnitude do retorno do impulso emitido. A intensidade depende de vários fatores: a potência de energia do impulso emitido, a fração de energia do impulso que intercepa a superfície, a refletância da superfície intercetada no comprimento de onda utilizado pelo laser e a fração da energia refletida que é devolvida até ao sensor (Lefsky *et al.*, 2002).

Segundo Harding (2008), quando devidamente calibrada, a informação da intensidade de retorno pode ser usada para criar imagens monocromáticas (Figura 27), imagens de refletância de uma banda no comprimento de onda do laser. Esta informação tem potencial para melhorar o valor da cartografia derivada do ALS, por proporcionar uma melhor diferenciação dos tipos de superfícies e objetos. Esta opinião é partilhada por outros autores como Habib (2008b), embora este saliente, simultaneamente, a dificuldade do processo.

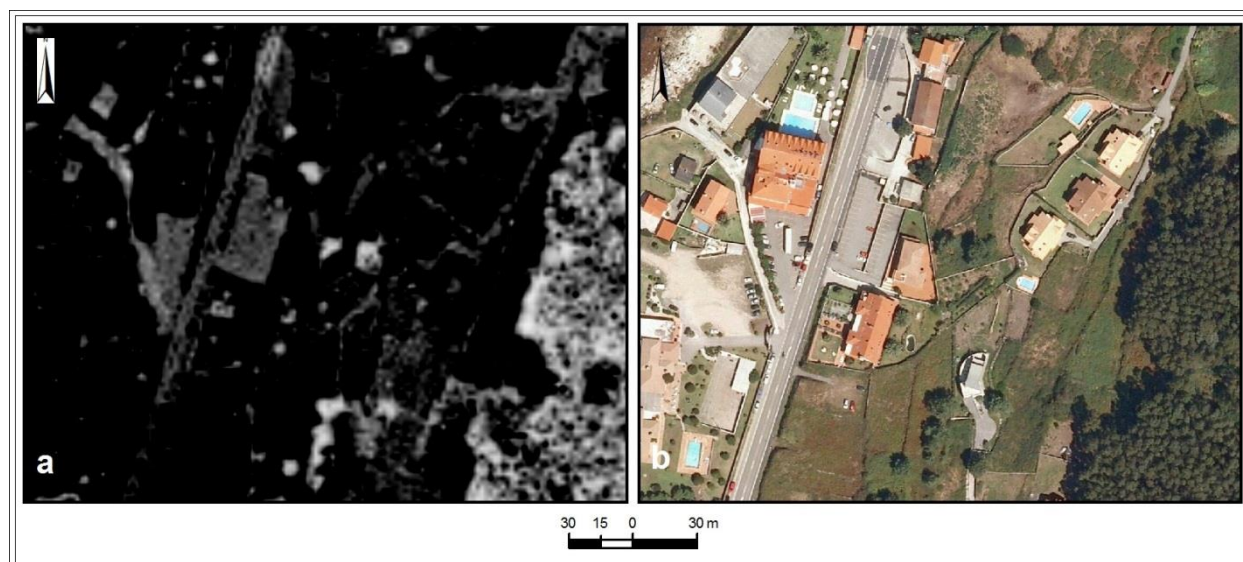


Figura 27- Imagem monocromática obtida a partir do valor de intensidade do levantamento por ALS utilizado (a) e respetivo ortofotomapa da área (b)

Esta potencialidade é aumentada pelo cruzamento desta imagem de intensidade com imagens dos canais RGB, facilitando a interpretação dos objetos à superfície.

Diversos autores têm procurado utilizar o valor da intensidade para diversos fins. Crutchley (2009) salienta a importância da intensidade das diferentes refletâncias dos objetos para a identificação de vestígios arqueológicos e Rottensteiner e Clode (2008) utilizam a informação de intensidade, conjugada com ortofotomapas, para a identificação de edifícios e estradas. Van Leeuwen e Nieuwenhuis (2010) abordam a utilização destes valores para a classificação de espécies arbóreas, apesar das dificuldades associadas.

Toth (2008), por seu lado, salienta a importância da utilização deste valor para efetuar o processo de ajustamento de faixas de varrimento após a aquisição dos dados, se utilizados conjuntamente com os dados da distância. Trata-se, por isso, de uma área ainda pouco explorada e de grande interesse para futuras pesquisas (Danson *et al.*, 2009).

O atributo *classificação* resulta, em grande parte, da possibilidade do ALS conseguir obter retornos múltiplos de um único impulso e também da obtenção de dados de intensidade sobre os mesmos, embora este último aspeto esteja, como referido, em fase de desenvolvimento.

Assim, a classificação representa a classe a que o ponto pertence. As classes em que o ponto pode ser classificado encontram-se definidas e variam nos formatos de armazenamento de pontos 0-5 e 6-10 (Tabela 7).

É importante referir que o processo de classificação é efetuado com o recurso a *softwares*. Contudo, apesar de atingirem taxas de sucesso elevadas, não concretizam a totalidade do processo com sucesso.

Além disso, frequentemente, após o processo de classificação, os produtos oferecidos aos clientes apenas possuem os pontos classificados como 2 (*Ground*), 1 (*Unclassified*), 7 (*Low point*) e 8 (*Model key-point*). Para a classificação das restantes classes será necessário *software* específico de processamento e um processo de classificação supervisionado.

FORMATOS 0-5		FORMATOS 6-10	
Código	Significado	Código	Significado
0	Created, never classified	0	Created, never classified
1	Unclassified	1	Unclassified
2	Ground	2	Ground
3	Low Vegetation	3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation	4	Medium Vegetation
5	High Vegetation	5	High Vegetation
6	Building	6	Building
7	Low Point (noise)	7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)	8	Model Key-point (mass point)
9	Water	9	Water
10	Reserved for ASPRS Definition	10	Reserved for ASPRS Definition
11	Reserved for ASPRS Definition	11	Reserved for ASPRS Definition
12	Overlap Points	12	Overlap Points
13-31	Reserved for ASPRS Definition	13	Wire – Guard (Shield)
		14	Wire – Conductor (Phase)
		15	Transmission Tower
		16	Wire-structure Connector (e.g.
		17	Bridge Deck
		18	High Noise
		19-63	Reserved
		64-255	User definable

Tabela 7- Classes de classificação do ALS para todos os formatos, na versão 1.4

Os ficheiros LAS ao serem lidos por um *software* com essa capacidade, transformam-se em nuvens de pontos dispersas segundo o trio de coordenadas (Figura 28), que podem ser manipuladas consoante os seus atributos na produção de diferentes produtos, de onde se destacam, em especial, os relacionados com a altimetria, nomeadamente a produção de Rede de Triângulos Irregular (vulgarmente conhecido como TIN, acrónimo de *Triangulated Irregular Network*), MDS e MDE.

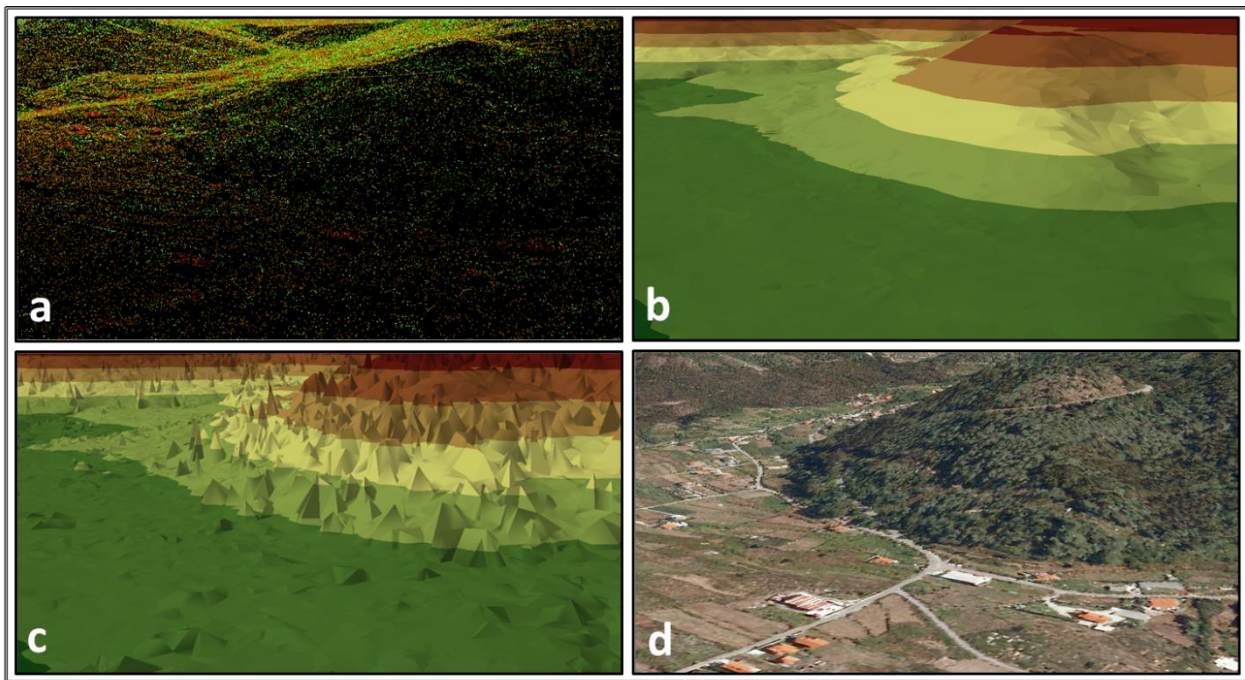


Figura 28- Exemplo de dados LAS da área de estudo utilizados.

a- Nuvens de pontos; b- TIN elaborado com os pontos correspondentes ao solo; c- TIN elaborado com todos os pontos; d- Ortofotomapa da área

3.3.3. Aplicações do ALS

Foi à medida que o ALS se foi desenvolvendo que mais investigadores tomaram conhecimento dos seus dados e que a sua utilização se expandiu, resultando daí novas descobertas e novas aplicações para este tipo de dados. Parece-nos óbvio que novas aplicações continuarão a surgir, dado que existem inúmeros campos de investigação com interesses na identificação de aspetos relacionados com a superfície terrestre e as alterações que nela ocorrem, especialmente as que se relacionam com questões altimétricas e com o modelado. Segundo Wehr e Lohr (1999), o ALS assume-se como uma técnica que pode complementar ou substituir parcialmente outras tecnologias de aquisição de dados, abrindo novas áreas de aplicação.

O ALS permite a obtenção de dados de forma precisa, rápida e versátil (Wehr e Lohr, 1999), possibilitando, após a correta manipulação dos dados, a obtenção de MDS e MDE de elevada precisão. Mesmo considerando apenas este tipo de dados, sem a junção com outros, sem a utilização do já referido valor de intensidade, ou sem a extração de outros atributos, facilmente se compreendem a utilidades destes simples produtos em diversas áreas.

O ALS tornou-se uma das principais ferramentas de auxílio à pesquisa em vários campos de investigação: Arqueologia, Agricultura, Botânica, Biologia, Ciências da Terra, Ecologia, Floresta, Geografia, Ciências Ambientais e Ecologia da Paisagem (Devereux e Amable, 2009).

Desta forma, os dados derivados do ALS podem assim ser utilizados com fins diversos. Associando as informações apresentadas por Ackermann (1999), Wehr e Lohr (1999), Brock *et al.* (2002), Lefsky *et al.* (2002), Mather (2004), Browell *et al.* (2005), Raber e Cannistra (2005), Webster e Forbes (2006), Olsen (2007), Devereux e Amable (2009), Heritage e Large (2009), Large e Heritage (2009), Campbell e Wynne (2011), Lemmens (2011), Oguchi *et al.* (2011), e Smith *et al.* (2011) o ALS pode ser usado nas aplicações sintetizadas na tabela 8.

APLICAÇÕES ALS	• Originar MDS/MDE (em áreas com e sem vegetação) de grande precisão
	• Elaborar cartografia de curvas de nível
	• Cartografar a batimetria
	• Elaborar cartas náuticas;
	• Gerir projetos de navegação
	• Estudar áreas costeiras, determinando as alterações na costa, transporte de sedimentos e erosão
	• Cartografar áreas pantanosas
	• Estudar redes de drenagem
	• Cartografar áreas de cheia/inundação
	• Elaborar modelos hidráulicos
	• Cartografar “corredores”, como estradas, linhas de caminho-de-ferro, oleodutos, etc.
	• Cartografar linhas de eletricidade e telefone
	• Cartografar estradas e caminhos em áreas florestais
	• Calcular volumes de terras em minas a céu aberto
	• Elaborar rapidamente cartografia e avaliar danos após um desastre natural
	• Medir a cobertura de áreas de neve e gelo, incluindo a monitorização de glaciares
	• Derivar parâmetros da vegetação: altura das árvores, diâmetro de copa, densidade de árvores, estimação de biomassa, determinação de limites de áreas florestais, identificação de espécies, etc.
	• Monitorizar o crescimento de plantas em agricultura de precisão
	• Elaborar cartografia geomorfológica: leques aluviais, formas de relevo tectonicamente deformadas, formas de relevo glaciares e deslizamentos
	• Identificar vestígios arqueológicos
	• Gerar MDS e MDE em áreas urbanas, para a extração de estruturas urbanas, extração de edifícios, geração de modelos 3D de cidades no âmbito do planeamento da localização de antenas de telecomunicações, aproveitamento de potencial solar, planeamento urbano, modelação de microclimas, propagação de poluição sonora e poluentes atmosféricos
	• Gerar modelos 3D para filmes e jogos de computador
	• Gerar modelos 3D para projetos de Arquitetura e projetos de simulação em Arquitetura e Engenharia Civil
	• Projetar estradas
	• Etc.

Tabela 8- Principais aplicações do ALS

Apesar de saírem do domínio deste trabalho, será de referir que, a todas estas aplicações relacionadas com a superfície terrestre, acrescem ainda aplicações no domínio da atmosfera, cujo desenvolvimento, inclusive, se iniciou numa fase anterior.

3.3.4. O ALS em Portugal

Em Portugal, a utilização deste tipo de dados encontra-se ainda numa fase que pode ser considerada embrionária, sendo relativamente poucos os trabalhos realizados.

As primeiras referências na literatura científica datam de meados da primeira década do século XXI, ou seja, cerca de uma década depois do início da utilização do ALS de forma comercial.

Nestas primeiras referências à utilização do ALS encontram-se os trabalhos de Gonçalves (2005), Pereira (2005) e Rodrigues *et al.* (2005), o primeiro e os últimos abordando a utilização dos dados em ambiente urbano e a segunda apresentando uma abordagem inicial à temática, nomeadamente no que concerne aos princípios de funcionamento e ao estado da arte.

Gonçalves-Seco *et al.* (2006) apresentam no ano seguinte um interessante artigo que aborda uma metodologia de elaboração de modelos digitais de terreno em áreas florestais através da filtragem dos dados e segmentando-os em vegetação alta e baixa.

Em 2007, Gonçalves e Gonçalves-Seco (2007), apresentam uma metodologia de classificação de objetos em áreas rurais a partir dos dados ALS e dos valores de intensidade associados, contribuindo para demonstrar a mais-valia deste tipo de dados na classificação do uso de solo.

Outros aspetos relacionados com a vegetação, nomeadamente os relacionados com inventariação florestal, começam a ser desenvolvidos no mesmo ano por Neves e Gonçalves (2007), num trabalho que teve desenvolvimento nos anos subsequentes, quer no mesmo domínio, quer associado ao risco de incêndio florestal, por Ferraz *et al.* (2009), Pereira *et al.* (2009a; b), Gonçalves e Pereira (2010a), Sarmento (2010), Gonçalves-Seco *et al.* (2011), Ferraz *et al.* (2012)

Ao nível da aplicação dos dados derivados do ALS desenvolveram-se também trabalhos relacionados com o desenvolvimento de modelos de cheias urbanas por Fernandes *et al.* (2009) e a integração de dados ALS com imagens CIR na criação de MDE em áreas urbanas, por Gonçalves e Pereira (2010b).

Além destes, será de destacar a dissertação de mestrado apresenta por Gomes (2011) que expõe uma interessante exploração dos dados ALS na avaliação do potencial solar em ambiente urbano, aplicando a ideia a uma pequena área do centro urbano da Vila de Carnaxide, no concelho de Oeiras.

As ideias anteriores são também apresentadas por Brito *et al.* (2012) num artigo científico publicado no ano de 2012 com o nome *Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data*.

Num domínio mais relacionado com a discussão da validade dos dados e com a procura de desenvolvimento de metodologias que permitam o aprimoramento da tecnologia ALS, é

possível encontrar mais alguns trabalhos significativos desenvolvidos em Portugal e/ou com o envolvimento de investigadores portugueses. Gonçalves (2006) surge novamente na vanguarda e procura analisar os erros de interpolação de MDE criados em ambientes urbanos a partir de dados ALS. Em 2011, este trabalho é continuado, quer por Gonçalves *et al.* (2011), quer por Santos (2011) na sua dissertação de mestrado.

Pereira e Gonçalves (2010) e Gonçalves e Pereira (2012) procuram fazer um exercício semelhante, mas desta feita, aplicando as formulações gerais de base em áreas florestais de eucaliptos, procurando compreender a precisão dos MDE obtidos nestas áreas.

Neste domínio, saliente-se ainda o projeto AutoProbaDTM²³ (*Automated Probabilistic Digital Terrain Model generation from raw LiDAR data*), desenvolvido por investigadores do Centro de Geofísica de Évora (Universidade de Évora), do Centro de Investigação em Ciências Geo-Espaciais do Porto (Universidade do Porto) e do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (Universidade de Coimbra) e que pretende desenvolver novas metodologias para a medição da topografia e das características do terreno. No âmbito deste projeto podem ser encontradas algumas importantes publicações, de onde se destacam as efetuadas por Gonçalves e Jalobeanu (2011) e Jalobeanu e Gonçalves (2011; 2012).

3.3.5. Vantagens e desvantagens do ALS

Apresentando inúmeras valências, o ALS distingue-se sobretudo pela sua extraordinária capacidade de adquirir informação sobre a altimetria da superfície terrestre e gerar MDE. Desta forma, as vantagens e desvantagens que apresenta terão de ser compreendidas, não só quando analisada a tecnologia por si só, mas também através de uma análise comparativa relativamente a outras técnicas de recolha de dados neste domínio, nomeadamente, o levantamento clássico, o levantamento por GPS, a Fotogrametria, a Radargrametria²⁴ ou o InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)²⁵.

Analizadas as ideias apresentadas por Burtch (2002), Mather (2004), Browell *et al.* (2005), El-Sheimy *et al.* (2005), Habib (2008a), Petrie e Toth (2008a), Wehr (2008a), Large e Heritage (2009), Large *et al.* (2009), Starek *et al.* (2009), Shan e Toth (2009), Toth (2008), Campbell e Wynne (2011) e Lemmens (2009; 2011), assim como analisadas as especificações

²³ Mais informações sobre o projeto AutoProbaDTM podem ser obtidas a partir da página do projeto em <https://sites.google.com/site/autoprobadt/home>

²⁴ Segundo Rees (1999), a Radargrametria é o processo de geração de um mapa através de imagens de radar. A técnica é semelhante à Fotogrametria, embora o ângulo de incidência oblíquo e a distorção geométrica inerente às imagens de radar imponha dificuldades significativas.

A Radargrametria utiliza a estereogrametria para determinar a topografia de uma área, através do valor de intensidade de retorno, embora não atue no domínio ótico, mas sim no âmbito do radar, ou seja, das micro-ondas.

²⁵ O InSAR, Interferometric SAR (Synthetic Aperture Radar), funciona de forma semelhante à Radargrametria. Segundo Campbell e Wynne (2011), o InSAR faz uso da comparação de fase interferométrica de duas imagens SAR da mesma região, adquirida de duas diferentes posições, ao contrário da Radargrametria que utiliza o valor de intensidade.

técnicas apresentadas pelos principais fabricantes, Airborne Hydrography AB (s.d.-a; b), Leica Geosystems AG (2007; 2008a; b; c), Optech Incorporated (s.d.-a; b; c), Riegl (2010; 2012a; b; c) e Trimble (2011a; b), para os diferentes sistemas ALS que comercializam, procedeu-se a uma sistematização das vantagens e desvantagens do ALS, que foram sintetizadas nas tabelas 9 e 10.

VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta grande versatilidade de aplicações
	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os retornos obtidos são posicionados num referencial de coordenadas X, Y e Z
	<ul style="list-style-type: none"> • Grande rigor e precisão dos pontos medidos, que segundo os principais fabricantes e alguns autores podem ser melhores que 15 cm na vertical e 10 cm na horizontal
	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de lasers com capacidade de emissão de impulsos que chegam aos 500Khz
	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de medir vários pontos por impulso emitido
	<ul style="list-style-type: none"> • Grande densidade de pontos recolhidos por m²
	<ul style="list-style-type: none"> • Dada a grande densidade de pontos por m², verifica-se uma menor necessidade de interpolação na geração de MDE
	<ul style="list-style-type: none"> • A grande densidade de pontos por m² permite a inquirição posterior na procura de aspetos que poderiam ser descurados no levantamento de campo através de outras técnicas
	<ul style="list-style-type: none"> • Grande nível de detalhe nos MDE produzidos, principalmente quando comparados com os elaborados com dados provenientes de outros métodos tradicionais
	<ul style="list-style-type: none"> • Os impulsos podem penetrar através da vegetação, permitindo a recolha de dados do solo por debaixo da mesma, ao contrário de outras técnicas
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite a geração de MDE em áreas de floresta e noutras áreas com vegetação densa
	<ul style="list-style-type: none"> • A recolha de dados é pouco dependente do estado de tempo e pode ser realizada de dia e de noite
	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida recolha e processamento dos dados (até cerca de 100 Km² por hora)
	<ul style="list-style-type: none"> • A maioria dos processos é automática pelo que é pouco dependente do Homem
	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de poucos procedimentos de pós-processamento quando comparados com outros métodos como a fotogrametria
	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para cartografar áreas pouco acessíveis
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite a utilização adicional de câmaras fotográficas digitais e a fusão dos dados
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite que não-especialistas em métodos tradicionais de aquisição de dados possam gerar informação detalhada em ambientes cada vez mais desafiantes e complexos
	<ul style="list-style-type: none"> • É frequentemente tida como uma tecnologia barata, quando são tidos em consideração de forma comparativa com outras técnicas, a velocidade, a precisão e a densidade dos dados obtidos
	<ul style="list-style-type: none"> • Permite a aquisição, de forma sistemática e relativamente barata, de dados ao longo do tempo e, assim, a compreensão de dinâmicas
	<ul style="list-style-type: none"> • A aquisição de dados complementares como o valor da intensidade

Tabela 9- Vantagens do ALS

De entre as vantagens, será de destacar a precisão apresentada que tem vindo a evoluir ao longo dos tempos e sobre a qual os autores apresentam valores nem sempre coincidentes, o que poderá prender-se com diversos motivos, do anacronismo da publicação, à qualidade dos dados com os quais trabalharam. Segundo Lemmens (2009), que compara as características dos sensores LiDAR produzidos pelos principais fabricantes, os valores são variáveis. A maioria dos sistemas apresenta valores de precisão vertical com valores inferiores a 15 cm e os sistemas Optech ALTM Gemini e ALTM Orion apresentam valores inferiores a 10 cm, a 1000 metros de altitude e num intervalo de 2σ , ou seja, num intervalo de confiança de 95%. Em termos

horizontais, a maioria dos sistemas apresenta, à mesma altitude e com o mesmo intervalo de confiança, valores inferiores a 10 cm.

Será, no entanto, de referir que os valores podem ser influenciados por diversos fatores como o ângulo de divergência da unidade de deflexão, a velocidade e a altitude da plataforma aérea, as condições atmosféricas e, em especial, a precisão do Sistema de Posicionamento e Orientação, constituído pelo IMU e DGPS.

Ao nível da densidade de pontos, os fatores mais influentes já foram anteriormente abordados, nomeadamente o movimento da plataforma, a frequência de emissão dos impulsos laser, o tipo de unidade de deflexão, a velocidade da unidade de deflexão, o ângulo de varrimento da unidade de deflexão, a altitude da plataforma e a refletância do solo.

No entanto, é aceite que as densidades são bastante elevadas. Segundo Lemmens (2009), as densidades de pontos adquiridos podem chegar a mais de 50 pontos por m^2 quando obtidas a baixas altitudes e a partir de um helicóptero (o Leica ALS60 Airborne Laser Scanner apresenta como especificações técnicas a possibilidade de adquirir valores de 91 pontos por m^2 a uma velocidade de 150Km/h e a uma altitude de 300 m). Embora as especificações da generalidade dos sensores apresentadas pelos fabricantes permitam adquirir valores de 4 ou 5 pontos/ m^2 , ou mesmo valores superiores a 10 pontos/ m^2 , estes valores referem-se normalmente a baixas altitude e baixos valores de velocidade de voo da plataforma, pelo que o aumento das duas variáveis, em termos práticos, levará a uma diminuição da densidade de pontos/ m^2 . Contudo, com isto não se quer dizer que os valores não sejam impressionantes e muito superiores a outras técnicas que atuam no mesmo domínio.

Destaque-se ainda, no que concerne às vantagens, a capacidade de geração de MDE a partir dos dados do ALS. A viabilidade de um extraordinário detalhe e a possibilidade de aquisição de informação sobre a topografia em áreas de floresta e vegetação densa, abrem novas portas de investigação mesmo usando este produto apenas para o refinamento de metodologias de investigação antigas, que muito podem beneficiar com a sua utilização.

A capacidade de obter mais do que uma medição a partir do mesmo impulso, abre também novas perspetivas em relação ao estudo de objetos sobre a superfície terrestre, quer infraestruturas de origem humana, quer elementos da vegetação, principalmente se esta característica for conjugada com a elevada densidade de pontos mensurados.

Ao nível das vantagens, será de destacar ainda a rápida aquisição e processamento dos dados, com pouca intervenção humana, o que confere enormes benefícios no desenvolvimento de projetos que necessitam de respostas rápidas, e que pode tornar vantajosa a utilização desta técnica, mesmo considerando desvantagens como o custo.

Por fim, a associação ao sensor de câmaras fotográficas permite a aquisição simultânea de fotografias aéreas, dividindo os custos operativos pelos dois tipos de produtos e baixando os custos finais de ambos.

DESvantagens	<ul style="list-style-type: none"> A densidade dos pontos não é uniforme, dependendo dos parâmetros de voo, do mecanismo da unidade de deflexão, da velocidade da unidade de deflexão, do ângulo de divergência da unidade de deflexão, da taxa de repetição do impulso, etc.
	<ul style="list-style-type: none"> Existência de erros diversos associados aos diferentes componentes do sistema, nem sempre fáceis de avaliar e controlar: erros de posicionamento e orientação, calibração do sensor laser, calibração da refletância do sensor, calibração entre os diferentes componentes do sistema, derivados da divergência do feixe de luz do impulso, derivados das características do solo e dos objetos, de sincronização temporal, de transformação de coordenadas, derivados da refração atmosférica, derivados da rigidez de montagem, etc.
	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldades na determinação da precisão.
	<ul style="list-style-type: none"> A má calibração pode resultar em interferências que causam falta de resolução, áreas em branco, etc.
	<ul style="list-style-type: none"> As precisões mais elevadas ocorrem a nadir e diminuem com o aumento do ângulo de varrimento.
	<ul style="list-style-type: none"> Os declives do terreno afetam a precisão vertical da medição, com os maiores erros a ocorrerem em vertentes mais declivosas.
	<ul style="list-style-type: none"> Problemas na aquisição de dados sobre a água, o que leva a dificuldades na delimitação de corpos de água e falta de cobertura sobre os mesmos.
	<ul style="list-style-type: none"> Algumas limitações impostas aos lasers utilizados, relacionados com preocupações de segurança ocular e prejuízo para a vida.
	<ul style="list-style-type: none"> Problemas de operação em algumas condições: <ul style="list-style-type: none"> - não pode ser utilizado acima de nuvens, nevoeiro, fumo, ou em dias de chuva ou tempestades de neve; - ventos fortes e turbulência podem originar problemas no IMU.
	<ul style="list-style-type: none"> Não é uma técnica tão madura como outras, como a fotogrametria, pelo que as suas limitações podem ainda não ser todas conhecidas.
	<ul style="list-style-type: none"> Pelo facto de ser recente, os <i>standards</i> ainda não se encontram todos bem definidos.
	<ul style="list-style-type: none"> Não é capaz de determinar <i>breaklines</i>.
	<ul style="list-style-type: none"> Os dados são recolhidos em padrões mais ou menos regulares, ou seja, o laser não pode ser apontado a objetos específicos, o que limita a precisão de definição dos objetos.
	<ul style="list-style-type: none"> As técnicas e tecnologias de manipulação dos dados necessitam de maiores desenvolvimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> Grande complexidade e custos associados às operações aéreas.
	<ul style="list-style-type: none"> Elevados custos no investimento inicial ao nível do <i>hardware</i> e <i>software</i>.
	<ul style="list-style-type: none"> É tida como uma técnica com elevados custos, principalmente quando não consideradas as vantagens comparativas.
	<ul style="list-style-type: none"> Dificuldades de manipulação dos grandes volumes de dados gerados, quer por parte o <i>hardware</i>, quer por parte do <i>software</i>.

Tabela 10- Desvantagens do ALS

Relativamente às desvantagens, será de destacar a existência de diversos erros que nem sempre são fáceis de avaliar e/ou controlar e que poderão influenciar a qualidade do produto final, nomeadamente no que respeita à precisão.

Por outro lado, a falta de uniformidade na distribuição de pontos, dependente de diversos fatores, e a impossibilidade de não se poder direcionar a medição, poderão levar à não apreensão de todos os aspetos do terreno, ou à sua apreensão incorreta, nomeadamente no que diz respeito aos limites das infraestruturas de origem humana.

O fator custo é discutível nesta análise e dependerá, como referido, das vantagens comparativas que forem ponderadas, sendo estas variáveis consoante o projeto em questão. No entanto, certo é que existem elevados custos associados à aquisição do *hardware* e *software* e às operações de voo associadas ao processo de aquisição. Será, por isso, necessário ponderá-los em relação aos custos associados à operacionalização de outras técnicas e às vantagens que esta apresenta.

Como um dos principais produtos derivados do ALS são os MDE, pensa-se ser pertinente uma pequena reflexão comparativa da elaboração deste tipo de produto com dados do ALS, relativamente a outros.

Será importante frisar, antes de mais, que todas as fontes de dados apresentam vantagens e desvantagens, pelo que a opção por um dos métodos deve ser feita com a definição de critérios como o objetivo, a precisão necessária, o equipamento indispensável, a disponibilidade de dados, a rapidez na sua aquisição, o tamanho da área a trabalhar, o custo associado, entre outros aspetos particulares dos projetos em questão.

A tabela 11 reúne algumas das principais características normalmente consideradas na decisão por uma fonte de dados.

Método de aquisição	Precisão dos dados	Velocidade de aquisição	Custo	Dimensão da área de aplicação	Qualidade do MDE derivado
Levantamento clássico	Elevada (mm-cm)	Muito lenta	Muito elevado	Pequenas	Elevada
Levantamento por GPS	Relativamente elevada (cm-m)	Lenta	Relativamente elevado	Pequenas	Elevada
Fotogrametria	Média a elevada (cm-m)	Rápida	Relativamente baixo	Médias a grandes	Média
Fotogrametria espacial	Baixa a média (m)	Muito rápida	Baixo	Grandes	Baixa
InSAR	Baixa (m)	Muito rápida	Baixo	Grandes	Baixa
Radargrametria	Muita baixa (10 m)	Muito rápida	Baixo	Grandes	Muito baixa
ALS	Elevada (cm)	Rápida	Elevado	Médias a grandes	Muito elevada
Digitalização manual de mapas	Relativamente baixa (m)	Lenta	Elevado	Qualquer área	Baixa
Digitalização automática de mapas	Relativamente baixa (m)	Rápida	Baixo	Qualquer área	Baixa

Tabela 11- Comparação entre vários métodos de aquisição de dados utilizados na geração de MDE (Alterado de Li *et al.* 2004)

Os dados da tabela presumem a utilização de boas práticas em todos os métodos utilizados, caso contrário, facilmente os valores associados à precisão dos dados podem diminuir significativamente.

Em termos de precisão, as diferenças são óbvias desde a precisão milimétrica do levantamento clássico até às dezenas de metros da Radargrametria. Como é referido por Li *et al.* (2004), obviamente, no caso da Fotogrametria e da Fotogrametria espacial, os resultados obtidos

dependem da qualidade das imagens utilizadas. O InSAR é uma boa técnica para a medição de deformações (alterações relativas), uma vez que pode atingir valores de 1 cm. Contudo, na aquisição de dados para a geração de MDE a precisão é de apenas cerca de 5 m.

Em termos de velocidade de aquisição, as diferenças também são notórias, apresentando o levantamento clássico os tempos mais elevados, tornando-se apenas adequado para a realização de trabalho de aquisição de pequenas áreas, com objetivos bem definidos e localizados.

Pelo contrário, os métodos que podem fazer uso de plataformas espaciais são claramente as que apresentam tempos de aquisição mais rápidos e simultaneamente abrangem maiores áreas.

Ilação semelhante pode retirar-se em relação aos custos, verificando-se que o levantamento clássico se assume como o mais dispendioso e que os métodos que utilizam plataformas espaciais apresentam custos mais reduzidos.

Resta associar estes pressupostos ao detalhe do produto gerado (MDE), de onde se destacam, pela sua qualidade, os derivados do ALS, em contraposição com o gerado pela Radargrametria. Será de referir, contudo, que o levantamento clássico e o levantamento por GPS, especialmente o primeiro, apesar de menor nível de detalhe, têm a possibilidade de apreender melhor os limites dos objetos, pois a localização da medição é totalmente controlada pelo operador. Contudo, frequentemente, este não é o utilizador final do produto, pelo que o seu trabalho poderá não ser o mais apropriado para os objetivos a alcançar.

Com isto, destacando-se pela qualidade do produto final, o ALS parece definir-se como uma técnica mais equilibrada, quando comparada com as restantes, embora a opção por esta ou por outra esteja sempre dependente de diversos fatores, como referido.

4. ENSAIO COMPARATIVO

4.1. A área de estudo: caracterização geral

A área em que centramos o estudo situa-se no norte de Espanha e ao longo do litoral oeste, fazendo parte da província de Pontevedra, integrada na Comunidade Autónoma da Galiza. O setor estudado abrange parte dos municípios de Baiona, a norte, e de Oia, a sul (Figura 29).

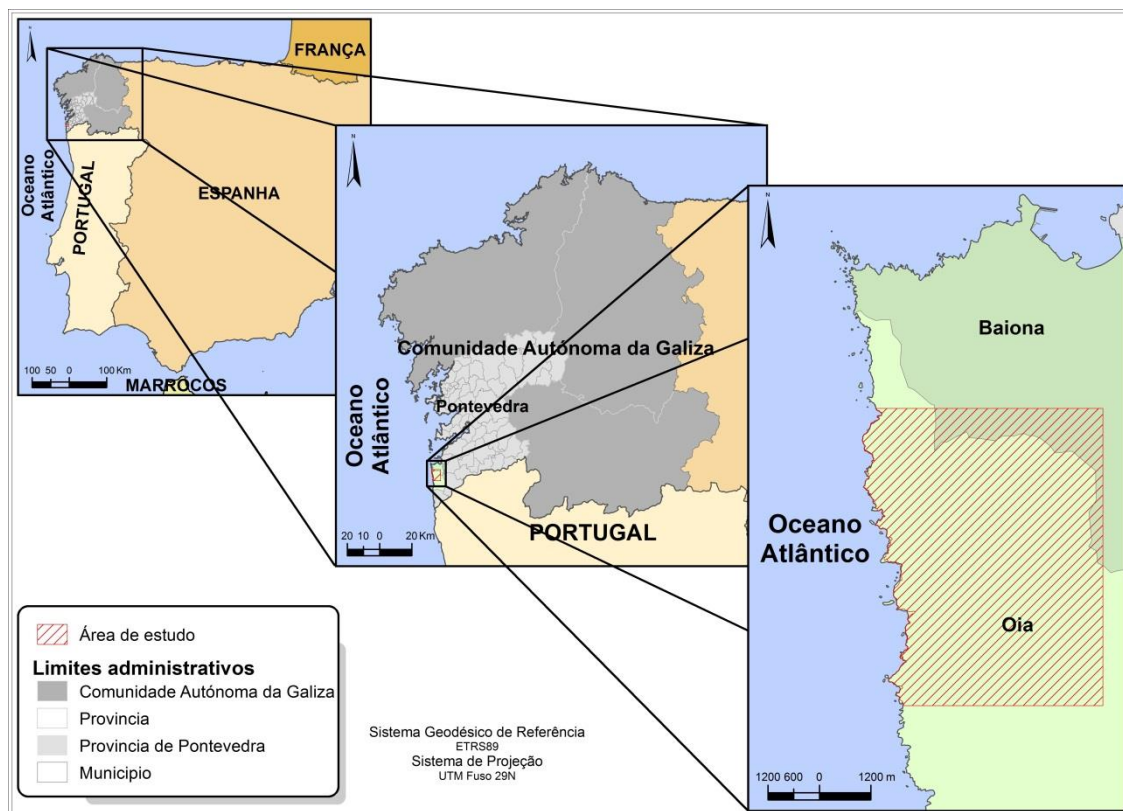


Figura 29- Localização da área de estudo.

O setor em estudo abrange uma área de cerca de $34,8 \text{ Km}^2$ e um perímetro de $27,7 \text{ Km}$. Trata-se de uma área que se estende ao longo de $10,8 \text{ Km}$ de linha de costa, segundo uma direção N/S e se alarga por mais de 5 Km para o interior, a este. Em termos máximos, apresenta um comprimento N/S de $6,9 \text{ Km}$ e E/O de $5,6 \text{ Km}$.

Apesar da sua reduzida dimensão, especialmente na direção este-oeste, a área, tendo como referência a cartografia da Base Topográfica Nacional (BTN) de Espanha à escala 1:25000, apresenta uma variação altimétrica significativa nessa direção (Figura 30a), verificando-se um desnível altimétrico que alcança os 654 metros de altitude em cerca de 5 Km , na direção O-E, embora, na parte sul, em pouco mais de 2 Km apresente uma diferença altimétrica de 590 m .

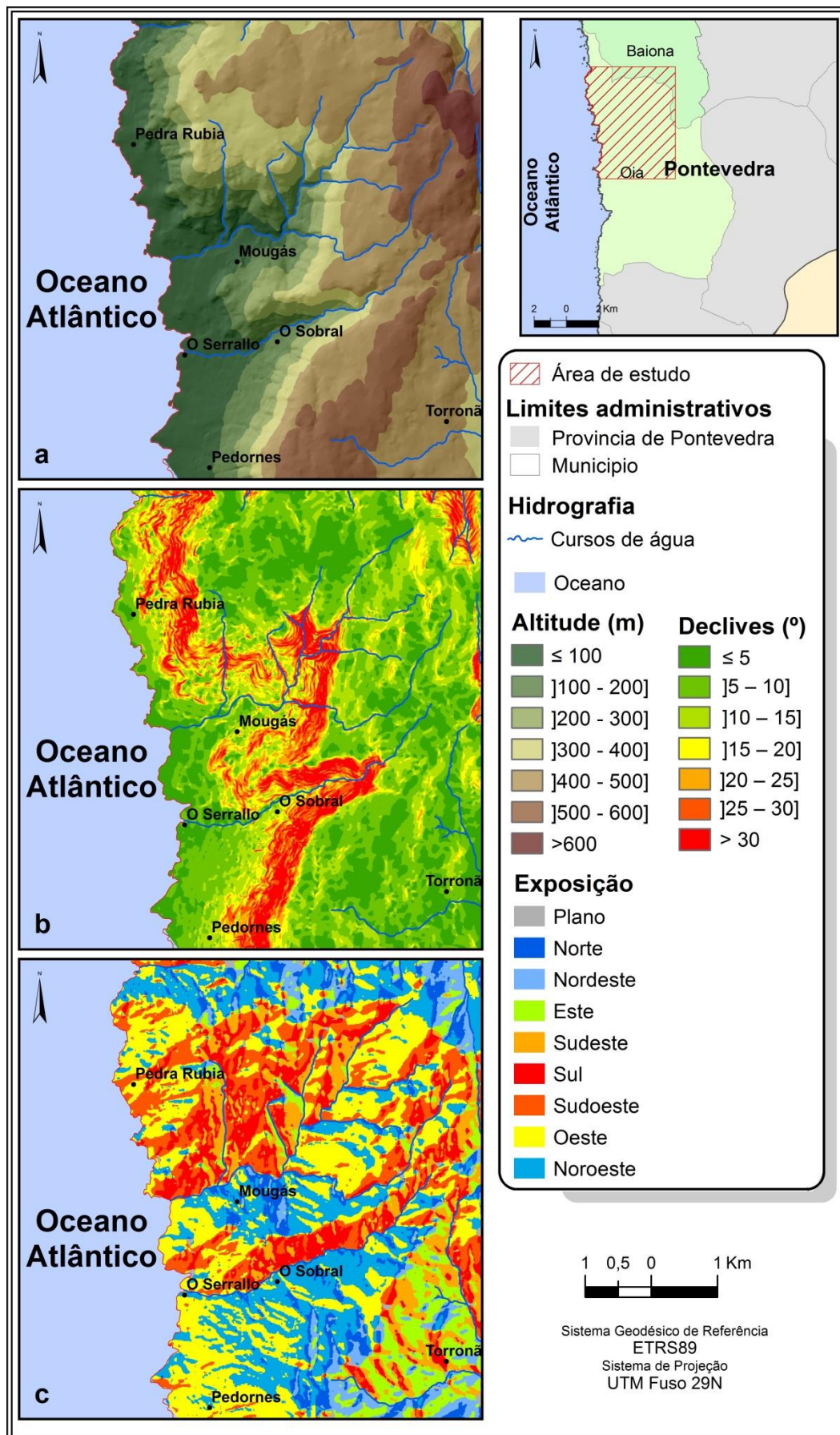


Figura 30- Características gerais da área de estudo com base na BTN à escala 1:25000: Hipsometria (a); Declives (b); e Exposição das vertentes (c).

Assim, é possível encontrar áreas com declives consideráveis, significando os declives com valores iguais ou superiores a 25°, 12,6% da área, embora predominem os declives das classes 5-10°, com 31,3% e <5°, com 22,2% (Figura 30b).

Os declives mais elevados encontram-se, quer nas vertentes sensivelmente paralelas à linha de costa, o que é particularmente visível na parte NO da área de estudo, quer ao longo dos vales referentes aos principais cursos de água, assumindo, desse modo, um encaixe considerável numa parte significativa da sua extensão.

Ao nível da exposição das vertentes, quase metade da área (47,7%) encontra-se exposta ao quadrante oeste, seguida, de longe (21,3%), pelo quadrante sul (Figura 30c). Esta tendência reflete a morfologia que acentua a sua altitude na direção O/E.

As vertentes viradas a sul e, de certa forma, as vertentes viradas a norte, correspondem, sobretudo ao encaixe dos dois principais cursos de água, rio de Mougás e rio de Vila de Suso.

De destacar também a exposição de vertentes ao quadrante este, localizando-se, na generalidade, na parte sudeste da área de estudo, denunciando a existência de um conjunto de topos alongados na direção NE/SO.

Em termos morfológicos, as direções NNE/SSW e N/S parecem nortear o arranjo do relevo, quer pelo já referido alinhamento dos topos na parte sudeste e vertentes costeiras, como também por corresponderem à direção da linha de costa e à direção aproximada dos principais vales que variam entre estas direções e a de OSO/ENE.

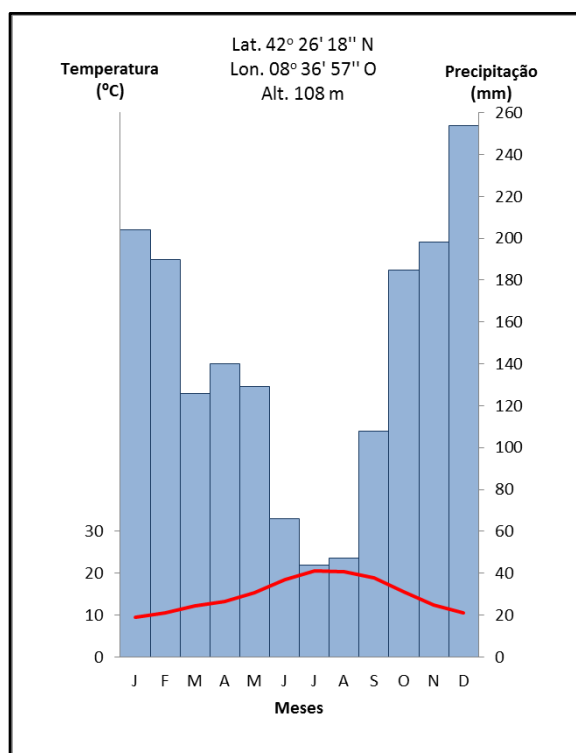


Figura 31- Gráfico Termopluviométrico da estação meteorológica de Pontevedra (1971-2000).

Nos setores localizados mais a este e mais a oeste, verificam-se variações altimétricas mais reduzidas, ou seja, apresentam-se como mais aplanadas, embora com valores de altitude diferentes. No primeiro caso, localizam-se as altitudes mais elevadas e, no segundo, as mais baixas da área de estudo.

Em termos hidrográficos, verifica-se a existência de pequenos rios (o rio de Mougás tem um comprimento máximo de 24,7 Km), que correm na referida direção e que apresentam algumas variações de caudal, fruto das características climáticas da área, sendo alguns dos seus afluentes, cursos de água de carácter efémero.

Em termos climáticos (Figura 31), a área é marcada por precipitações abundantes, com um

total anual de 1671 mm. A precipitação distribui-se irregularmente, com máximos nos meses de inverno e outono, sendo o valor mais elevado registado no mês de dezembro (254 mm), e com mínimos nos meses de verão, onde julho apresenta o valor mais reduzido (44 mm). Apesar deste valor reduzido, a área não regista nenhum mês seco, sendo o critério $P \leq 2T$.

A temperatura é moderada ao longo de todo o ano, embora manifeste a tendência inversa à da precipitação, isto é, verificam-se máximos nos meses de verão, onde julho e agosto apresentam, respetivamente, 20,5 °C e 20,4 °C de temperatura média, e mínimos nos meses outono e inverno, em que dezembro e janeiro apresentam respetivamente, 10,5 °C e 9,5 °C.

Ao nível do uso do solo, predominam, segundo o nível 3 da *Corine Land Cover* 2006 (CLC2006), as áreas de *Florestas mistas de folhosas e coníferas*, ocupando 43,1% da área, distribuindo-se um pouco por toda a área, mas demonstrando mais importância numa faixa que dispõe sensivelmente N/S. Os *Pastos naturais*, localizados no setor de maior altitude, na parte este, ocupam 27,3% da área de estudo.

De referir, ainda, as *Charnecas ou matos*, que se localizam sobretudo na parte NO e as *Zonas principalmente agrícolas com zonas naturais importantes*, que se encontram associados alguns povoamentos e que se localizam, sobretudo, junto ao litoral oeste e ao longo da estrada PO-552, que atravessa a área de forma sensivelmente paralela à linha de costa.

Na segunda parte do ensaio referente aos parâmetros de comparação hidrológica e à geração dos perímetros de inundação, a área de estudo centra-se na principal bacia hidrográfica da área de estudo (Figura 32), que corresponde ao curso de água conhecido como rio de Mougás. Trata-se de uma bacia hidrográfica de forma sensivelmente circular, com uma área de 11,7 Km² e extensão máxima de 4,97 Km.



Figura 32- Bacia hidrográfica do rio de Mougás.

4.2. Os dados de base

No ensaio comparativo realizado, foram utilizados diversos tipos de dados, de proveniências distintas e com diferentes escalas.

Além dos dados do ALS, foram utilizados MDE com a resolução espacial de 5 metros, provenientes do *Plan Nacional de Ortofotografia Aérea* (PNOA), cartografia da Base Topográfica da Galiza (BTG) à escala 1:5000 e cartografia da Base Topográfica Nacional de Espanha à escala 1:25 000.

Toda a informação usada se encontrava no mesmo sistema geodésico de referência, *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), com projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM), fuso 29 do hemisfério norte.

Os dados do ALS utilizados fazem parte de um voo combinado com a utilização de uma câmara digital, realizado no âmbito do PNOA, em fevereiro de 2010, e cedidos pela *Xunta da Galicia* com a finalidade estrita de desenvolvermos a nossa investigação, uma vez que estes dados ainda não foram disponibilizados ao público.

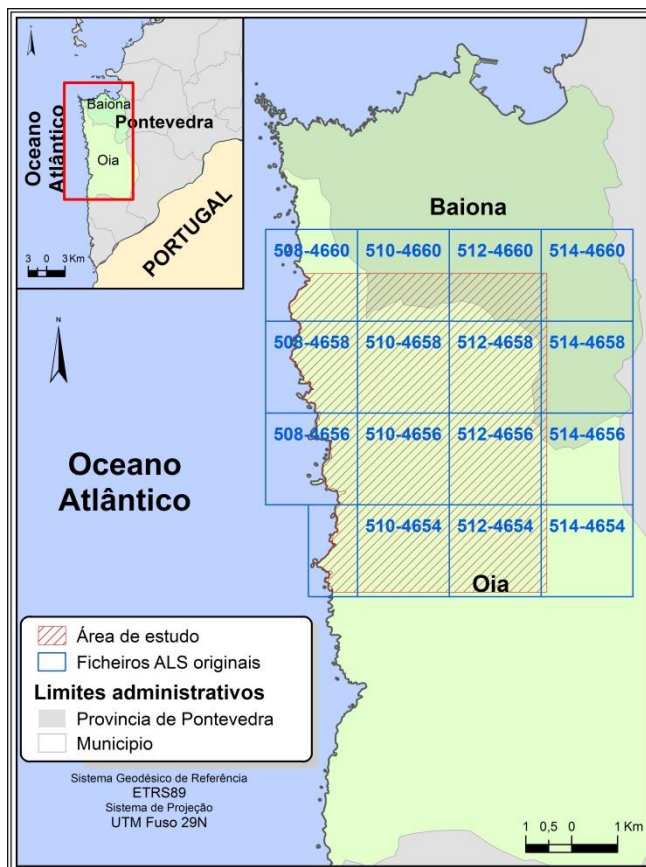


Figura 33- Ficheiros de pontos ALS utilizados e área de abrangência do levantamento.

O levantamento ALS abarca uma área superior à definida como área de estudo. Apenas foram usados 16 ficheiros que abrangiam inicialmente uma área de 57,27 Km² e eram formados por 101932446 pontos, variando entre os -349 metros e os 1194,2 metros de altitude (Figura 33).

Dado que não tivemos acesso a todos os metadados associados ao levantamento ALS, não foi possível apurar algumas características importantes como a altitude e velocidade de voo, o sensor utilizado, a frequência de impulso, o comprimento de onda utilizado, a frequência de varrimento, a precisão *a priori* e outros parâmetros derivados. Contudo, foi possível saber que o levantamento foi efetuado como recurso a uma plataforma aérea do tipo avioneta.

A análise dos ficheiros permitiu conhecer um conjunto diverso de características importantes. O sensor utilizado possui capacidade de armazenar até 5 retornos por cada impulso

emitido, os ficheiros foram armazenados na versão 1.1 e encontravam-se classificados, tendo sido utilizado para o seu pós-processamento o *software* TerrascanTM da Terrasolid®.

A generalidade dos pontos (Tabela 12) corresponde ao primeiro retorno (96,49%). A mesma proporção (embora com um número absoluto ligeiramente diferente) correspondia, também, ao último impulso. Verificou-se também que 93,09% dos pontos apenas apresentaram um único impulso.

Retornos	Número de pontos	%	Z min	Z Max
Primeiro	98358544	96,49	-283,70	1194,24
Segundo	3470637	3,40	-349,00	1170,52
Terceiro	95868	0,09	2,2	1081,33
Quarto	6506	0,01	8,29	1023,16
Quinto	891	0,00	15,60	956,86
Último	98356462	96,49	-349,00	1176,21
Único	94885840	93,09	-283,70	1176,21
Primeiro de muitos	3472704	3,41	-0,81	1194,24
Último de muitos	3470622	3,40	-349,00	1170,52
Todos	101932446	100	-349,00	1194,24

Tabela 12- Características gerais dos pontos derivados do levantamento por ALS.

Em termos altimétricos, verifica-se uma amplitude de 1543,24 metros, um valor considerável, principalmente se tivermos em consideração a dimensão reduzida da área do levantamento e as suas características. No entanto, será de considerar, como é fácil de compreender, que estes são valores extremos, que correspondem a erros de aferição de distância e que se encontravam filtrados, sendo a amplitude altimétrica dos pontos classificados como solo de apenas 654,6 metros, variando entre os -2,0 metros e os 652,6 metros de altitude (Tabela 13).

Pelo padrão apresentado pelos pontos, o levantamento parece ter sido efetuado com o recurso a uma unidade de deflexão com um polígono de rotação e apresentava uma densidade média de pontos de 1,78 pontos/m², isto se forem considerados todos os pontos. Considerando apenas os pontos classificados como solo, a densidade média era de apenas 0,58 pontos /m².

A classificação efetuada (Tabela 13) apresentava os pontos divididos em oito classes. Destas, destacavam-se claramente das restantes, as classes *12 Overlap* e a *2 Ground*, com 49,92% e 32,83% dos valores totais. Ou seja, verificou-se a existência de um grande número de pontos sobrepostos, resultantes de varrimentos de diferentes linhas de voo, que, por apresentarem maiores probabilidades de erro, já que se localizam nos extremos da área de varrimento, foram separados dos restantes. Por outro lado, se retirarmos a classe *12 Overlap*, a classe correspondente aos pontos sobre o solo (*2 Ground*) destaca-se claramente das restantes.

A quantidade de pontos que não foram classificados (*0 Never Classified*) é desprezável, assim como são em número reduzido os pontos que não foram classificados (*1 Unclassified*).

Classe	Número de pontos	%	Z min	Z Max
0 Never Classified	933	0,00	7,2	399,92
1 Unclassified	5706106	5,60	-349,00	1146,92
2 Ground	33460014	32,83	-2,00	652,60
3 Low Vegetation	7455141	7,31	-1,82	652,86
4 Medium Vegetation	1505414	1,48	-0,81	651,68
5 High Vegetation	2771232	2,72	-1,18	655,25
6 Building	150596	0,15	3,85	642,87
12 Overlap	50883010	49,92	-314,68	1194,24

Tabela 13- Características gerais dos pontos derivados do levantamento por ALS, por classe

Uma parte da nuvem de pontos resultante dos dados iniciais, representada segundo a altitude, pode ser observada na figura 34. Apenas se apresenta uma visão parcial, já que a extensão, associada à elevada densidade de pontos, impossibilita uma representação adequada do conjunto.

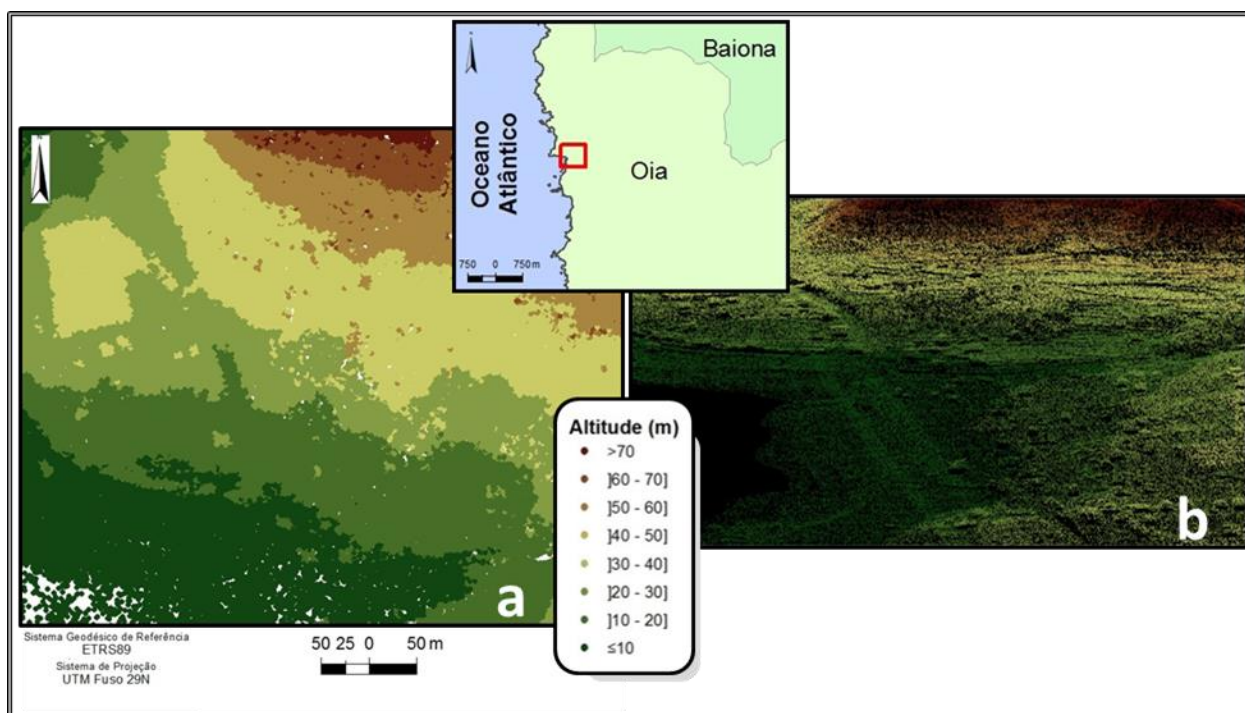


Figura 34- Extrato da nuvem de pontos ALS representados por altitude (m).

a- Nuvem de pontos 2D (apenas 11,4% dos pontos da área representados); **b-** Nuvem de pontos 2,5D (perspetiva de sul)

Os ficheiros de nuvens de pontos foram acompanhados de dois ortotomapas RGB (Figura 35) com uma resolução espacial de 0,25 m, que se constituem, por si só e sem qualquer manipulação da informação, como uma grande mais-valia, pois permitem a obtenção do conhecimento indireto da área de forma extraordinária.

O Modelo Digital de Elevação provenientes do PNOA (Figura 36) foi descarregado do *Centro de Descargas do Centro Nacional de Información Geográfica do Instituto Geográfico*

Nacional de Espanha. Os dois ficheiros obtidos correspondem às folhas 260 e 261 da quadrícula do *Mapa Topográfico Nacional* (MTN) de Espanha à escala 1:50000, encontravam-se em formato ASCII e datam do ano de 2008. Estes ficheiros, com uma resolução espacial de 5 metros, foram obtidos por um processo de correlação automática partir dos voos fotogramétricos no âmbito do projeto PNOA (CNIG, 2008).

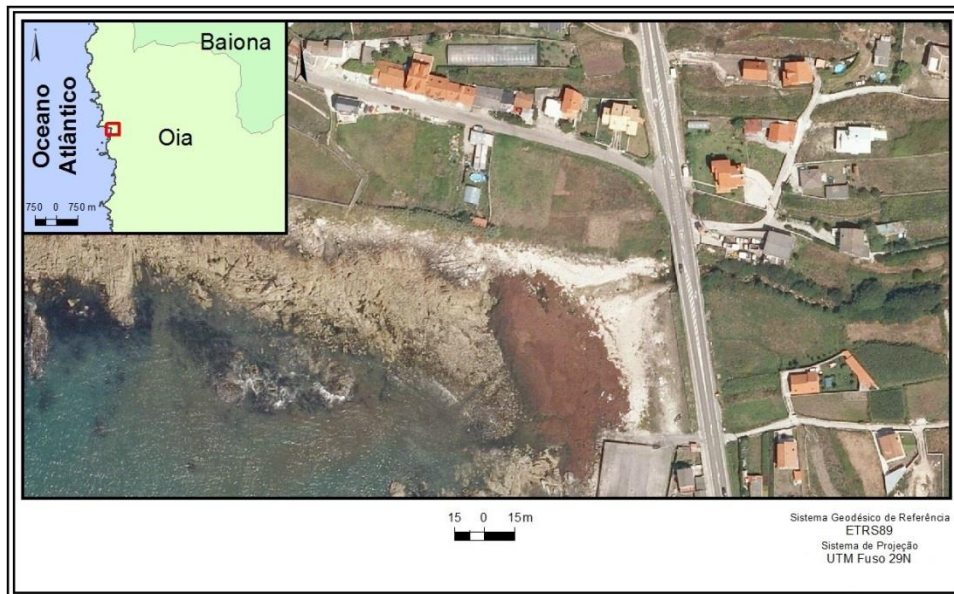


Figura 35- Extrato do Ortofotomapa

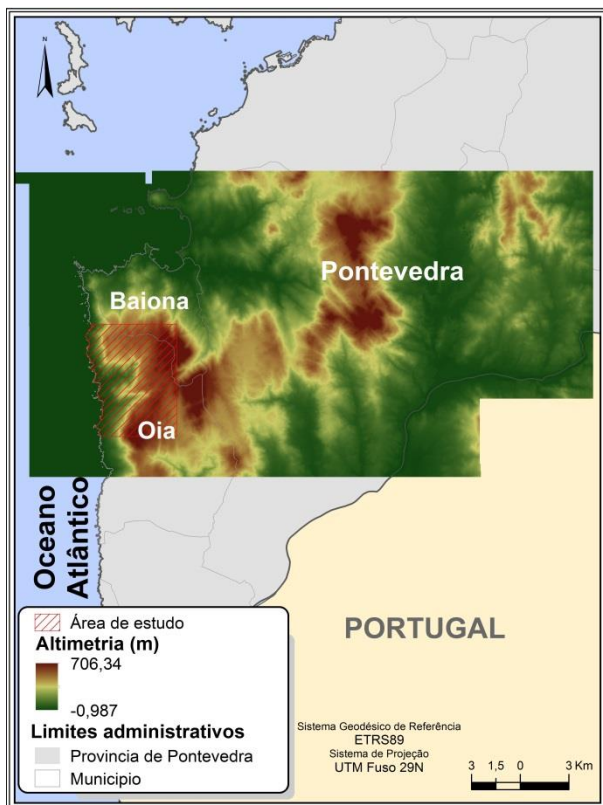


Figura 36- Modelo Digital de Elevação 5x5 metros, folhas n.º 260 e n.º 261

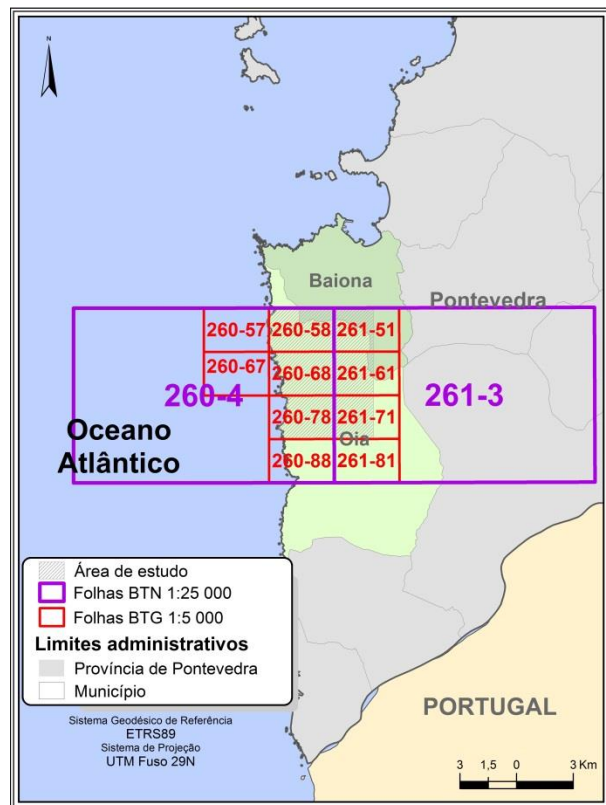


Figura 37- Limite das folhas da Base Topográfica da Galiza à escala 1:5000 e BTN à escala 1:25000 utilizadas

Os dados da Base Topográfica da Galiza 1:5000 foram provenientes da *Xunta da Galicia* e encontram-se divididos em 10 ficheiros vetoriais em formato DGN (Figura 37), correspondentes a parte das folhas n.º 260-4 e n.º 261-3 da Base Topográfica Nacional de Espanha, à escala 1:25000.

Por fim, foram também utilizadas as já referidas folhas n.º 260-1 e n.º 261-3 (Figura 37) da Base Topográfica Nacional de Espanha à escala 1:25000, obtidas, igualmente, por descarga do *Centro Nacional de Información Geográfica* do *Instituto Geográfico Nacional* de Espanha. Todos os ficheiros se encontravam em formato *shapefile* e foram criados a partir de pares estereoscópicos ou ortofotomapas no âmbito do projeto PNOA (CNIG, 2012).

A informação mais relevante acerca de todos os dados de base utilizados, encontra-se sintetizada na tabela 14.

Dados	Escala / Resolução	Tipos de dados	Data	Folhas / Ficheiros	Formato de dados	Fonte
Dados ALS	1,78 Ptos/m ²	Pontos	2010	508-4656, 508-4658, 508-4660, 510-4654, 510-4656, 510-4658, 510-4660, 512-4654, 512-4656, 512-4658, 512-4660, 514-4654, 514-4656, 514-4658, 514-4660	LAS	PNOA, cedidos pela <i>Xunta da Galicia</i>
MDE	5 (m)	Matricial	2008	260 e 261	ASCII	<i>Centro Nacional de Información Geográfica</i> do <i>Instituto Geográfico Nacional</i> de Espanha
Base Topográfica da Galiza (BTG)	1:5000	Linhas (curvas de nível) Pontos (Pontos cotados)	2003	260-57, 260-58, 260-67, 260-68, 260-78, 260-88, 261-51, 261-61, 261-71 e 261-81	DGN	<i>Xunta da Galicia</i>
Base Topográfica Nacional de Espanha (BTN)	1:25000	Linhas (curvas de nível) Pontos (Pontos cotados)	2006	260-4 e 261-3	Shp	<i>Centro Nacional de Información Geográfica</i> do <i>Instituto Geográfico Nacional</i> de Espanha

Tabela 14- Síntese das características dos dados de base utilizados

4.3. Metodologia do ensaio

A abordagem metodológica estabelecida para dar resposta aos objetivos definidos (Figura 38) passou, numa primeira fase, pela seleção da informação altimétrica de base disponível e que seria apropriada e suficientemente diversificada para estabelecer uma comparação entre MDE.

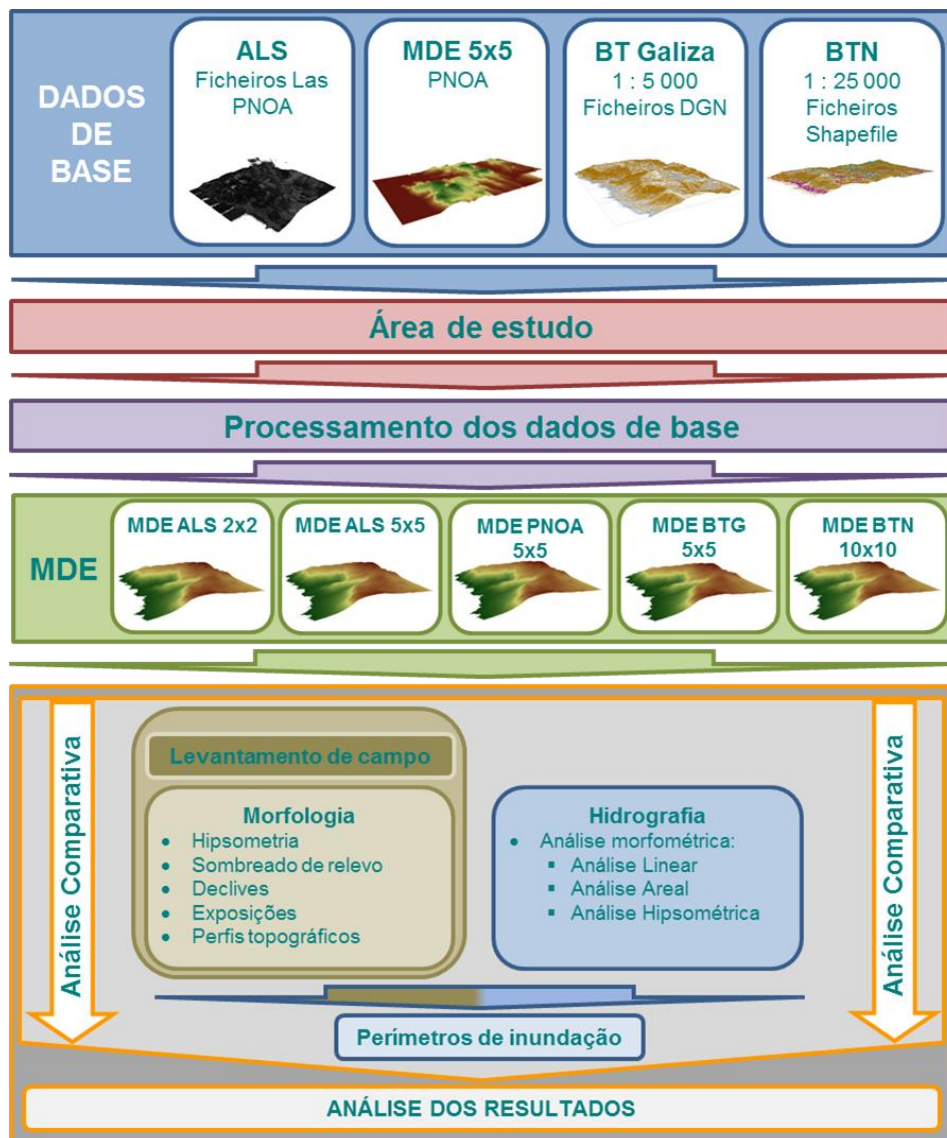


Figura 38- Abordagem metodológica

Com esta seleção de informação procurou ter-se condições para averiguar as diferenças que os MDE produzidos a partir dos dados do ALS e os seus produtos derivados implicam na representação e interpretação da morfologia do terreno, uma vez que se presume que estas só podem ser efetuadas de forma comparativa com modelos e produtos derivados de outras fontes de dados.

Os diferentes tipos de informação sofreram diversas operações de processamento até a constituição do respetivo MDE, mas, para todos, dada a extensão superior de todas as fontes de

informação usadas em relação à área que serviu de base ao ensaio, a primeira operação foi a delimitação pela área utilizada.

Em relação a esta área, já explanada no ponto anterior, refira-se que na definição da sua extensão e configuração foi tida em especial consideração a delimitação da principal bacia hidrográfica usada na segunda parte do ensaio. Em relação ao limite oeste, ele corresponde à linha de costa, sendo esta considerada como a linha de separação entre o mar e a terra (Alves-da-Silva e Ventura, 2011). Por se tratar de um limite difícil de definir, dada a sua dinâmica constante e diversificada (Alves-da-Silva e Ventura, 2011), verificou-se uma discordância entre os limites definidos pela cartografia utilizada. Desta forma, optou-se pela utilização do limite definido pela cartografia 1:5000 que, pela sua maior escala, terá maior probabilidade de estar definido de maneira mais correta.

Contudo, será de referir que este facto não invalida a existência de algumas discrepâncias na informação, havendo situações em que o limite definido pela BTN 1:25000 se encontra a este do limite definido e situações em que quer os dados do MDE com resolução de 5 metros obtido do PNOA, quer os dados derivados do ALS apresentam valores altimétricos negativos. Tais factos, todavia, não constituirão necessariamente erros, pois poderão corresponder a uma de duas situações. Primeiro, podem corresponder a localizações em que a linha de costa está mal definida. Segundo, estes locais podem, de facto, corresponder a localizações de altitude negativa, isto porque a linha de costa é essencialmente constituída por uma costa rochosa com morfologia muito irregular, facto que poderá permitir situações em que a altitude, dado o substrato rochoso escavado e irregular (em relação ao nível do mar), seja negativa.

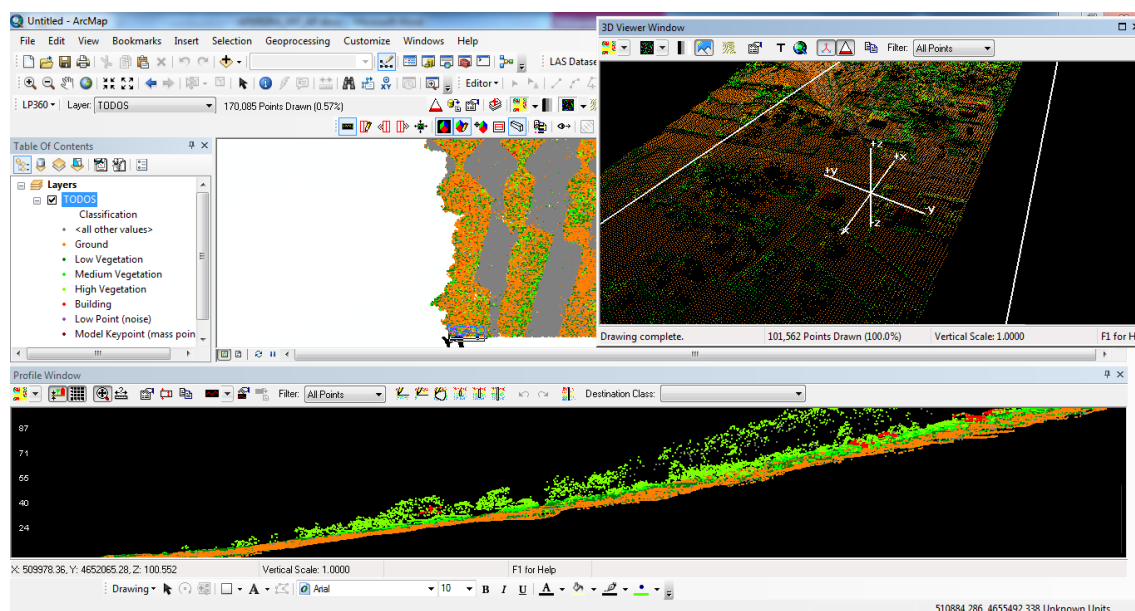


Figura 39- Processo de verificação/correção utilizando o software LP360 (representação dos pontos por classificação)

No que concerne à nuvem de pontos do levantamento do ALS, após a delimitação pelo limite da área do ensaio, foi efetuado um processo de verificação/correção da classificação dos

pontos utilizando o *software* LP360TM da QCoherent®, de maneira a avaliar a consistência da mesma. O processo desenvolveu-se através de um procedimento de análise por perfil (Figura 39), de forma sucessiva e interativa, com o auxílio dos ortofotomapas, realizando-se os necessários reajustes, um procedimento moroso, mas que permite validar a qualidade dos mesmos. Contudo, verificou-se que o processo de classificação anteriormente realizado havia sido bem conseguido, pelo que os ajustes foram efetuados apenas com os pontos classificados com altitude desajustada na classificação 7 *Noise*.

Após este dois procedimentos iniciais, a nuvem de pontos derivada passou a apresentar as características demonstradas na tabela 15.

Área (Km ²)	34,46
Número de pontos	68273946
Densidade (Pontos/m ²)	1,98
Espaçamento (m)	0,71
Altitude máxima (m)	1194,24
Altitude mínima (m)	-349,00
Altitude máxima sobre o solo (m)	652,60
Altitude mínima sobre o solo (m)	-1,54

RETORNOS	Número de pontos	%	CLASSE	Número de pontos	%
Primeiro	841	96,19	0 Never Classified	841	0,00
Segundo	65673760	3,68	1 Unclassified	3546842	5,15
Terceiro	2515594	0,11	2 Ground	19908927	29,16
Quarto	77752	0,01	3 Low Vegetation	4217128	6,18
Quinto	5967	0,00	4 Medium Vegetation	878299	1,29
Último	873	96,19	5 High Vegetation	1743062	2,55
Único	63157045	92,51	6 Building	105343	0,15
Primeiro de muitos	2516715	3,69	7 Noise	514643	0,75
Último de muitos	2515644	3,68	12 Overlap	37388861	54,76
Todos	68273946	100			

Tabela 15- Características da nuvem de pontos do ALS correspondente à área de ensaio, após processamento dos dados iniciais.

Dada a vontade de realizar MDE com esta informação, optou-se por extrair para novos ficheiros os dados referentes à classe 2 *Ground*, o que deu origem a uma nova nuvem de pontos referente apenas ao solo, cujas características podem ser observadas na tabela 16.

Área (Km ²)	30,38
Número de pontos	19908927
Densidade (Pontos/m ²)	0,66
Espaçamento (m)	1,24
Altitude máxima (m)	652,60
Altitude mínima (m)	-1,54

Tabela 16- Características da nuvem de pontos do ALS correspondente à área de ensaio, com a classificação 2 *Ground*

A densidade dos pontos sobre o solo é um parâmetro bastante importante para a elaboração de um MDE, muito mais que a densidade de pontos do levantamento. Esta densidade condiciona a resolução do MDE, ou seja, o tamanho da célula utilizada na sua elaboração, quanto menor o tamanho da célula, maior a resolução espacial. A construção de um MDE com elevada resolução a partir de uma nuvem de pontos com uma baixa densidade de pontos levará a maiores interpolações, provocando um maior número de erros no MDE final.

A este respeito, Hu (2003) refere que uma boa aferição da resolução com que é possível elaborar um MDE a partir de um levantamento ALS é dada pela relação estabelecida pela equação:

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}}$$

onde A corresponde à área e n ao número de pontos sobre o solo. Isto significa que a resolução do MDE deve ser igual à densidade de amostragem dos pontos iniciais. Neste caso, este valor é de 1,24, o que, em teoria, permite a elaboração de MDE com resoluções iguais ou inferiores a este valor, ou seja com o tamanho da célula igual ou superior a 1,24 m.

Contudo, o tipo de terreno e a cobertura da vegetação poderão levar a desigualdades na densidade média de pontos sobre o solo. Ou seja, a existência de diferenças a estes níveis na área de levantamento – por exemplo, a existência de áreas com vegetação muito densa e outras de solo nu – pode levar a que se verifiquem grandes discrepâncias na distribuição da densidade dos pontos, pois, na primeira situação, o sensor vê a sua capacidade de medição condicionada pela capacidade de penetração na vegetação muito densa.

Assim, sendo a densidade média dos pontos sobre o solo de 0,66 pontos/m², ou seja, existindo pelo menos um ponto por cada 2 m², importava averiguar a distribuição efetiva dos pontos. Desta forma, a nuvem de pontos foi novamente avaliada de forma a determinar a sua consistência ao nível da densidade de pontos, calculando-se a distância euclidiana de cada ponto em relação ao seu vizinho mais próximo. Para tal, dividiu-se a área de ensaio em células regulares de 1x1 metros e calcularam-se as distâncias euclidianas para as células envolventes.

Os resultados permitiram concluir que, a uma distância de 1, 2 e 5 metros, respetivamente, 90,5%, 98% e 99,9% dos pontos têm pelo menos um ponto na sua vizinhança (Tabela 17). Ou seja, os pontos apresentam uma distribuição bastante regular, o que permite perfeitamente a elaboração de MDE com pelo menos 2 metros de resolução. Os valores mais elevados são residuais e verificam-se apenas nas situações em que os retornos foram obtidos em situações específicas: ou por cima de construções humanas, como habitações ou indústrias, ou sobre a vegetação muito densa e que, como tal, foram classificados como não solo (Figura 40). Trata-se de uma situação perfeitamente normal, especialmente no primeiro dos casos, em que à

partida, a superfície subjacente aos pontos retirados é uniforme e a interpolação do valor do solo se efetua a partir dos pontos na envoltória.

Distância euclidiana (m)	%	% Acumulada
$\leq 0,5$	51,3	51,3
]0,5-1]	39,3	90,5
]1 - 2]	7,4	98,0
]2 - 3]	1,6	99,5
]3 - 4]	0,3	99,8
]4 - 5]	0,1	99,9
> 5	0,1	100

Tabela 17- Distância euclidiana (m) entre os pontos do ALS, por classe e %

Simultaneamente, este é um bom exercício para aferir da classificação dos pontos, pelo menos entre os pontos classificados com solo e não solo, dado que é evidente que as maiores distâncias se verificam nas áreas onde os pontos foram, corretamente, classificados em classes que não o solo.

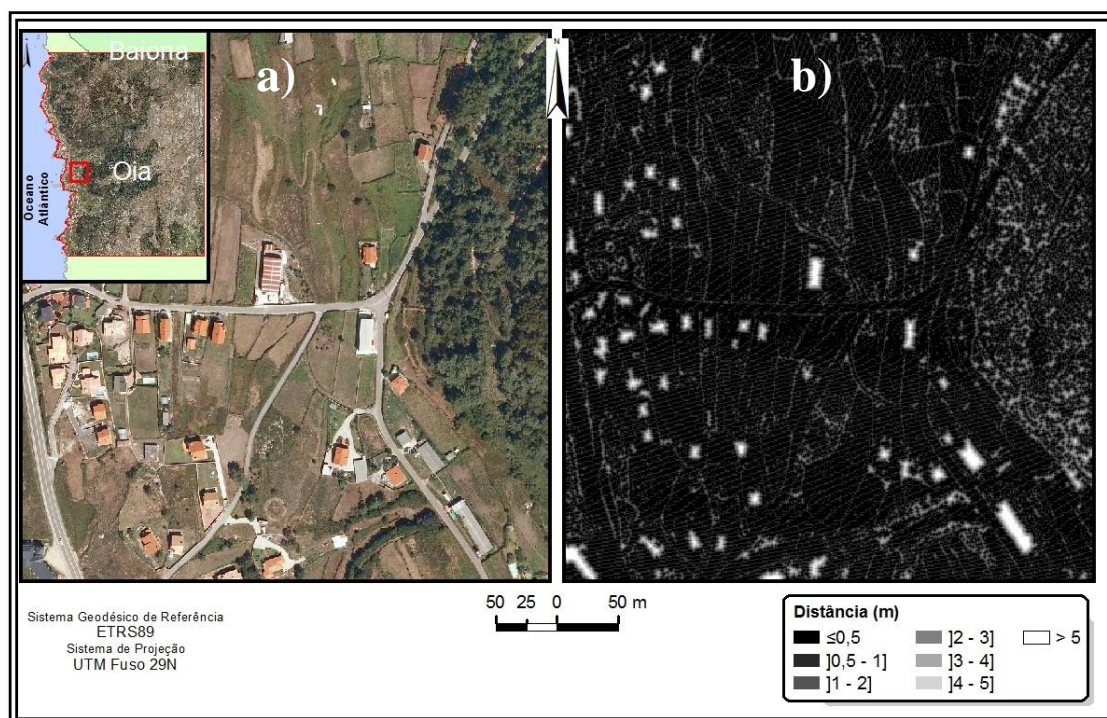


Figura 40- Extrato da área de estudo: **a)** ortofotomapa: **b)** Distância euclidiana entre os pontos derivados do ALS, por classe.

No que concerne à Base Topográfica da Galiza 1:5000, além da linha de costa utilizada para a definição do limite oeste da área do ensaio, foram utilizadas as informações referentes à altimetria correspondente aos pontos cotados e às curvas de nível, que possuíam uma equidistância de 5 metros.

Esta informação sofreu operações de verificação de consistência, especialmente no caso das curvas de nível, que foram verificadas uma a uma, tendo-se procedido à retificação de inconsistências, como a eliminação de falhas no seu traçado. Para tal, foram utilizados dois *softwares*, nomeadamente o Autocad 2010TM da Autodesk® e o ArcMapTM da ESRI®.

Após processamento, os 1667,9 quilómetros das curvas de nível e os 554 pontos cotados (Tabela 18) foram utilizados como informação de base para a construção do MDE.

	Distância (km) / Número	Altitude máxima (m)	Altitude mínima (m)
Curvas de nível	1667,9	655	0
Pontos cotados	554	655,49	1,67

Tabela 18- Características gerais das curvas de nível e pontos cotados da informação derivada da BTG à escala 1:5000

Os mesmos procedimentos de análise e correção foram realizados em relação à cartografia da BTN à escala 1:25000, cujas curvas de nível possuíam uma equidistância de 10 metros.

Após as atividades de processamento a informação sintetizada na tabela 19, passou a estar disponível para a elaboração do MDE.

	Distância (km) / Número	Altitude máxima (m)	Altitude mínima (m)
Curvas de nível	833,0	650	0
Pontos cotados	208	654	3

Tabela 19- Características gerais das curvas de nível e pontos cotados da informação derivada da BTN à escala 1:25000

Após todas estas atividades de processamento, especialmente da informação proveniente do levantamento ALS, BTG à escala 1:5000 e BTN à escala 1:25000, foram elaborados os respetivos MDE.

A elaboração dos MDE foi precedida da construção de uma Rede de Triângulos Irregular, em que os pontos de coordenadas tridimensionais (x, y e z) são ligados por linhas, formando uma rede de triângulos irregulares não sobrepostos.

A opção por este tipo de modelo inicial seguiu a ideia exposta por Casaca *et al.* (2005) que o consideram adequado para a representação de amostras irregulares recolhidas por métodos topográficos e fotogramétricos convencionais, permitindo uma maior fidelidade na representação de linhas de descontinuidade do relevo. Na sua elaboração, foi utilizada a metodologia de *Delaunay*, que pressupõe a criação de triângulos o mais “equilátero” possível, cujos lados não se intersejam (Casaca *et al.*, 2005), utilizando o critério do circuncírculo, em que no interior de um círculo que passa pelos três vértices do triângulo não pode estar contido nenhum outro ponto além dos vértices do triângulo que o formou (El-Sheimy *et al.*, 2005).

Elaborados os modelos TIN, procedeu-se à sua transformação para formato matricial, utilizando como parâmetros o respetivo tamanho de célula desejado (a que apelidamos doravante de resolução) e o método do *Natural Neighbors*, que calcula o valor de cada célula tendo em

consideração a interpolação com os triângulos vizinhos. Assim, procurou obter-se valores mais harmoniosos e ajustados à realidade, uma vez que, dependendo do tamanho da célula, poderiam estar contidos um ou vários triângulos em cada célula.

O resultado destes procedimentos foi a elaboração de cinco MDE com as designações e resoluções referidos na tabela que se segue.

Fonte de informação	Resolução (m)	Designação do MDE gerado
Nuvem de pontos classificados como solo do ALS	2	MDE ALS 2x2
Nuvem de pontos classificados como solo do ALS	5	MDE ALS 5x5
MDE do PNOA obtido por correlação automática a partir dos voos fotogramétricos (Folhas n.º 260 e 261 da quadrícula MTN 1:50000)	5	MDE PNOA 5x5
BTG 1:5000 (folhas 260-57, 260-67, 260-58, 260-68, 260-78, 260-88, 261-51, 260-61, 260-71 e 260-81 da quadrícula 1:5000)	5	MDE BTG 5x5
BTN 1:25000 (folhas 260-4 e 261-3 da quadrícula 1:25000)	10	MDE BTN 10x10

Tabela 20- Fontes de informação dos MDE gerados e respetiva resolução.

A metodologia proposta apresenta particular incidência na comparação dos MDE elaborados com a mesma resolução geométrica, ou seja, aqueles que apresentam resolução de 5 metros, pois presume-se que estes reúnem as melhores condições de equidade para efetuar tal comparação. Contudo, pareceu-nos interessante a inclusão na comparação de MDE de 2 e 10 metros de resolução. No primeiro dos casos, porque a densidade média dos pontos derivados do ALS o permite e, além disso, presume-se que as vantagens que o MDE ALS 5x5 possa apresentar serão acentuadas com a maior resolução. No segundo caso, por se tratar de uma informação não só muito utilizada, mas também amplamente certificada, tornando-se assim relevante a comparação dos restantes produtos com este.

A primeira parte do ensaio pressupunha a comparação dos MDE gerados e dos produtos derivados. No entanto, antes de se elaborarem os produtos derivados e a realização de quaisquer outras operações de comparação, tornou-se importante a execução de um levantamento de campo por GPS que possibilitasse a comparação dos valores obtidos com os valores apresentados pelos MDE elaborados.

Na concretização deste procedimento, foi utilizado um GPS da marca Trimble modelo GeoXTTM GeoExplorer 2008, que tem capacidade de medição com precisão superior a 30 centímetros, após processo de correção diferencial (Trimble, 2009).

Os pontos no terreno foram colhidos de forma dispersa e aleatória, tendo-se tido o cuidado de efetuar medições ao longo de estruturas fixas e pouco mutáveis com o tempo (cruzamentos, praças, ...), acautelando as possíveis alterações a que a área está sujeita.

Foram tidos especiais cuidados durante o levantamento para a diminuição dos erros derivados da má manipulação do GPS ou erros de satélite. O levantamento foi efetuado num dia de céu limpo, em áreas abertas com pouca ou nenhuma influência da envolvente, o recetor GPS e

a antena foram sempre estacionados de forma apropriada, foram utilizados sempre mais de quatro satélites na aquisição dos dados, foi estabelecido como limite para a aquisição de dados no parâmetro *Position Dilution of Precision* (PDOP)²⁶ o valor mínimo de 4 e para o parâmetro *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)²⁷ foi definido o valor mínimo de 39 dB-Hz²⁸.

No final do levantamento, foram colhidos 30 pontos, a partir de 4173 medições (Figura 41). Embora, inicialmente, existisse a intenção de efetuar a recolha de mais dados, tal não foi possível pela indisponibilidade do GPS utilizado, o qual nos foi cedido, e pelas dificuldades de trabalho de campo impostas em grande parte da área, que apresenta dificuldades nos acessos e vegetação arbórea de grande porte – fatores que limitaram a recolha de dados ao longo das vertentes mais declivosas ou nas suas imediações.

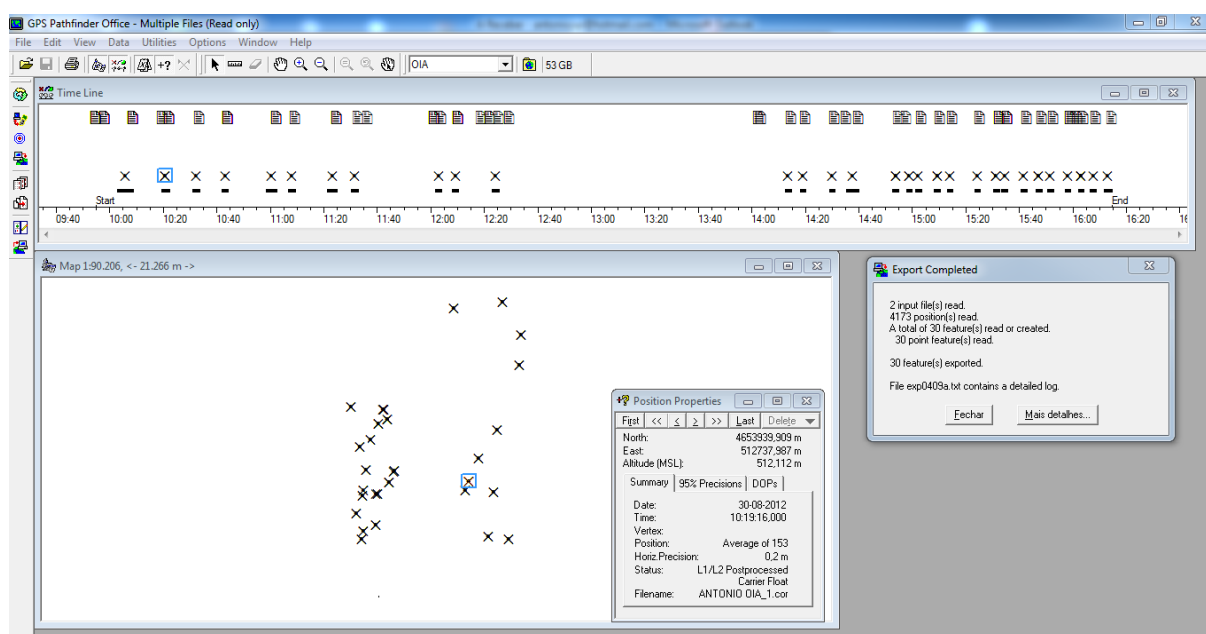


Figura 41- Conclusão do processo de exportação dos dados para o formato nativo do ArcGIS® a partir do *software* GPS Pathfinder™

Após a recolha dos pontos foi utilizado do *software* GPS Pathfinder™ para a descarga, correção diferencial e exportação dos pontos para o formato nativo do *software* ArcGIS® (Figura 41).

No processo de correção diferencial, foram usados os dados da estação de Vigo (estação de referência) que dista 21 quilómetros da área de estudo. Após este processo, chegou-se aos resultados finais das medições efetuadas, que constam na tabela 21.

²⁶ A *Position Dilution of Precision* (PDOP) é um parâmetro que avalia a qualidade das posições obtidas pelo GPS, baseada na geometria dos satélites utilizados. Quando os satélites se encontram bastante espaçados entre eles o valor do PDOP é baixo e a precisão da medição é superior. Quando os satélites se encontram próximos uns dos outros verifica-se o inverso. (Trimble, 2009)

²⁷ O *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) consiste numa medida da força do sinal do satélite. A precisão diminui à medida que a força do sinal diminui. (Trimble, 2009)

²⁸ dB-Hz- Decibel (Hertz): corresponde ao comprimento de onda relativo a 1Hz. 30dB-Hz, corresponde a um comprimento de onda de 150 Hz. <http://en.wikipedia.org/wiki/Decibel>

Precisão	% de medições
0-15cm	5,2
15-30cm	55,1
30-50cm	33,6
0,5-1m	4,5
1-2m	0,2
2-5m	1,1
>5m	0,2

Tabela 21- Resultados finais das medições efetuadas por GPS, após o processo de correção diferencial.

Na mesma localização destes 30 pontos foi extraída dos diferentes MDE a informação de altitude correspondente à sua localização. Assim, foi possível calcular os desvios, o Erro Médio Quadrático (EMQ), e verificar qual dos modelos se aproxima ou se afasta mais dos valores altimétricos derivados do GPS, estabelecendo um dos MDE como referência para alguns dos procedimentos imediatos.

Nesse seguimento, foi elaborada uma matriz regular e ortogonal de pontos com um equidistância de 100 metros, originando uma rede constituída por 3451 pontos, que foi utilizada para estabelecer a correlação entre os diferentes MDE, com o de referência, procurando avaliar os desvios em relação a este. Esta situação foi o recurso encontrado para solucionar a dificuldade em estabelecer a comparação direta de todos os valores, dado, não só o número elevado de células, mas também o facto de os modelos apresentarem diferentes resoluções.

O MDE de referência foi também utilizado para avaliar as diferenças em relação aos restantes MDE de alguns parâmetros estabelecidos, tais como: EMQ, diferença mínima, diferença máxima, amplitude de diferenças, diferença média e desvio padrão.

Foram ainda analisadas as diferenças entre todos os MDE no que concerne a um conjunto de parâmetros relacionados com a altitude (valor mínimo, valor máximo, intervalo de altitudes, altitude média, desvio padrão e dispersão relativa) e superfícies derivadas, como o sombreado de relevo, a exposição das vertentes e os declives, tendo a comparação destes últimos sido efetuada após a classificação dos valores em classes de intervalos de igual valor.

Além destes aspetos, foram ainda comparados os resultados de alguns perfis topográficos e calculados os desvios face ao MDE de referência.

Dada a dificuldade em representar graficamente as diferenças para a totalidade da área, foram escolhidos exemplos e, numa segunda fase, foi individualizado um setor na área de estudo, designado como A, onde procurou salientar-se alguns aspetos de pormenor, comparando os resultados da interpretação do MDE com os dados de campo.

Na segunda parte do ensaio, procurou comparar-se, através da aplicação à hidrografia, a qualidade dos dados de base de cada MDE. A partir destes e juntamente com os dados dos MDE procedeu-se à definição automática de perímetros de inundação. A opção pela exploração da

comparação dos diferentes MDE com base neste tipo de parâmetros pareceu-nos pertinente, já que o estudo dos fenómenos hidrográficos e hidrológicos se apresenta, na atualidade, com um corpo sólido de conhecimentos amplamente divulgados e, simultaneamente, se afigura como uma área de importância no processo de mitigação das perigosidades associadas aos mesmos, sendo parte constituinte de diversos tipos de planos no âmbito do processo de planeamento e ordenamento do território.

Para alcançar tais objetivos, foram utilizados, numa primeira fase, as ferramentas do *Arc Hydro Tools* do software ArcGIS® e, numa segunda fase, para a elaboração dos perímetros de inundação, a extensão *HEC-GeoRAS* do mesmo software e o software HEC-RAS.

O trabalho inicial consistiu na definição automática dos cursos de água e respetivas bacias hidrográficas da área de estudo através dos procedimentos referidos na figura 42, assim como, na avaliação do conjunto de parâmetros indicados na tabela 22.

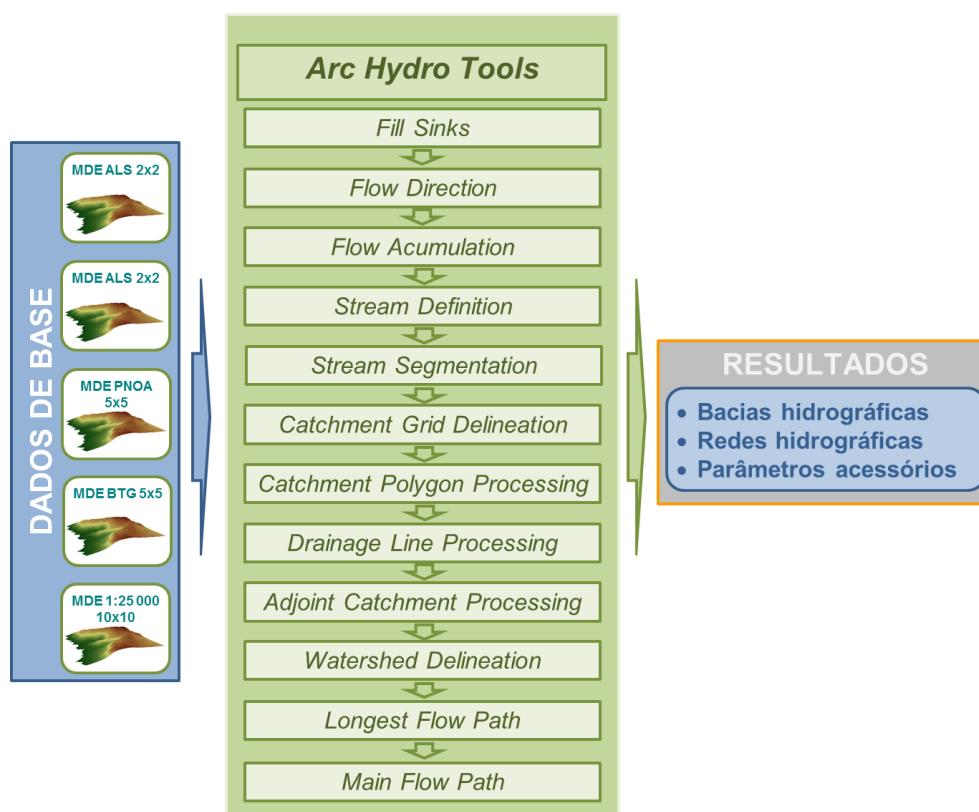


Figura 42- Procedimentos desenvolvidos com a caixa de ferramentas *Arc Hydro Tools*, com vista à obtenção dos dados sobre a hidrografia da área de estudo.

De seguida, o trabalho subordinou-se, especialmente, à bacia hidrográfica do rio de Mougás, a maior bacia hidrográfica da área de estudo, tendo-se efetuado uma análise dividida em três partes: características topográficas (análise hipsométrica), características da rede hidrográfica (análise linear) e características geométricas (análise areal), pois estas são consideradas como muito importantes na dinâmica fluvial (Velhas, 1991). Para cada uma destas

três partes foram calculados os parâmetros referidos na tabela 41, em anexo 3, que foram utilizados na comparação efetuada.

Número de bacias hidrográficas
Área total das bacias hidrográficas (km ²)
Comprimento total da rede de drenagem (Km)
Número de segmentos constituintes das redes hidrográficas
Segmento de menor comprimento (Km)
Segmento de maior comprimento (Km)
Densidade de drenagem (km/ Km ²)
Área da bacia hidrográfica de maior dimensão (Km ²)
Área da bacia hidrográfica de menor dimensão (Km ²)
Perímetro da bacia hidrográfica de maior dimensão (Km)
Perímetro da bacia hidrográfica de menor dimensão (Km)

Tabela 22- Parâmetros utilizados na caracterização inicial da hidrografia criada para a área de estudo

Além destes parâmetros, foram elaborados perfis longitudinais do rio de Mougás e avaliadas as diferenças em relação ao MDE de referência, dando-se especial enfoque aos MDE com a resolução de 5 metros que apresentam melhor comparabilidade.

Ao nível das características hipsométricas, foram também construídas e comparadas curvas hipsométricas, elaboradas a partir dos diferentes modelos e calculado o respetivo erro médio quadrático.

Os traçados dos rios principais foram alvo de comparação entre si e com os traçados da rede hidrográfica representada na BTG 1:5000 e BTN 1:25000, a mesma que constituiu referência para a elaboração de dois dos MDE. Para tal, procedeu-se, previamente, a um processo de suavização do traçado dos rios, através de um algoritmo de aproximação polinomial com um *Kernel* exponencial, considerando uma distância de tolerância de cinco vezes o tamanho da resolução do MDE que deu origem ao rio, procurando assim a eliminação do efeito *pixelizado* e aproximando o seu aspeto à realidade.

A comparação foi efetuada não só de forma visual, mas também com a quantificação, para cada um dos MDE, do comprimento da rede hidrográfica que se localizavam às distâncias de 2,5, 5 e 10 metros a partir da rede hidrográfica da cartografia 1:5000 e BTN 1:25000.

Na parte final do trabalho, foi efetuada a modelação hidráulica de um troço do rio de Mougás, com o objetivo de avaliar os impactos das possíveis diferenças da altimetria e morfologia entre os distintos MDE, no processo de geração de perímetros de inundação.

A determinação dos perímetros de **cheia** e altura da coluna de água partiu dos MDE e cursos de água obtidos a partir destes e seguiu os procedimentos enunciados na figura 43.

Na determinação das características do uso do solo, no que concerne à sua rugosidade, foram utilizados os valores de Manning (Tabela 23), com base nos valores propostos por

Brunner (2008), e considerando o tipo de uso de solo presente, segundo a *Corine Land Cover* 2006.

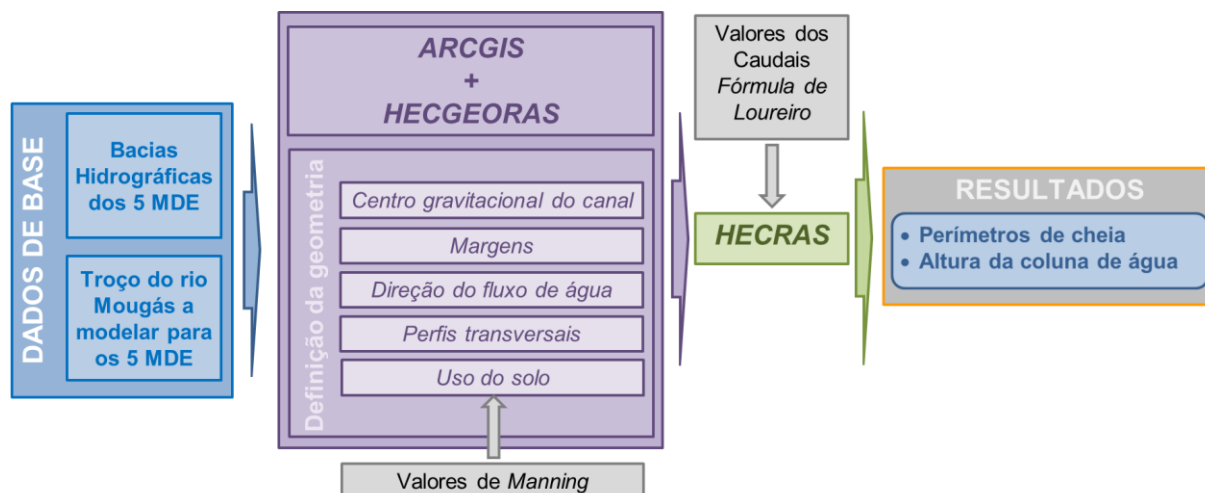


Figura 43- Processo de determinação dos perímetros de cheia e altura da coluna de água

Uso do Solo	Coefficiente de Rugosidade, segundo os valores de Manning
Sistemas culturais e parcelares complexos	0,04
Zonas principalmente agrícolas com zonas naturais importantes	0,04
Florestas mistas de folhosas e coníferas	0,06
Pastos naturais	0,03
Charnecas ou matos	0,02
Floresta ou vegetação arbustiva de transição	0,025
Canal	0,05

Tabela 23- Valores de Manning utilizados em relação à rugosidade do solo

Na definição dos perímetros, foram considerados três períodos de retorno (10, 50 e 100 anos) e três caudais potenciais (Tabela 24), determinados a partir da fórmula de Loureiro (1984), isto, dadas as dificuldades de determinar, nesta área específica, os caudais por outros métodos. Embora o autor apresente as suas formulações para o território português, presumiu-se que, dadas a proximidade geográfica (cerca de 12 km da fronteira) e as características da área de estudo, as formulações apresentadas por este poderão ser extensíveis à área de estudo, sem prejuízo para as conclusões, até porque o parâmetro é o mesmo para todas as modelações não prejudicando as comparações a realizar.

Período de retorno	Caudal (m ³ /s)
10 anos	40,15726
50 anos	55,71316
100 anos	63,37588

Tabela 24- Período de retorno e respetivos caudais de cheia calculados para a rio de Mougás.

4.4. Resultados do ensaio comparativo

4.4.1. Os Modelos Digitais de Elevação e os produtos derivados

A análise dos MDE iniciou-se com a comparação dos valores da altitude obtidos pelo levantamento efetuado por GPS com os valores de altitude registados nos diferentes MDE, considerando as mesmas localizações.

Os dados sintetizados na tabela 25, referentes ao Erro Médio Quadrático (EMQ) permitem aferir que os MDE derivados do ALS, em especial o MDE ALS 5x5, são os que se aproximam mais dos valores obtidos pelo levantamento por GPS. Isto significa, de facto, que os valores obtidos através de ALS apresentam não só uma boa qualidade, mas também que, aparentemente, significam uma melhoria de qualidade ao nível da obtenção do rigor altimétrico no que concerne à produção de Modelos Digitais de Elevação. Note-se que, entre o MDE ALS 5x5 e os MDE BTG 5x5 e MDE BTN 10x10, os valores obtidos representam diferenças com valores superiores a 10 vezes em relação ao EMQ apresentado pelo primeiro.

Assim, e na sequência destes resultados, estabeleceu-se, como modelo de referência para algumas das comparações que se seguem o MDE ALS 5x5.

	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
EMQ (m)	1,50	1,49	2,48	4,53	4,89

Tabela 25- EMQ (m) calculado entre as medições obtidas no levantamento por GPS e os valores interpolados a partir dos diferentes MDE para as mesmas localizações

Simultaneamente, os valores permitem obter, desde logo, uma noção dos possíveis resultados da análise que se segue, marcada por esta constatação.

De modo a comparar os valores de altitude entre os diferentes MDE utilizou-se inicialmente uma malha de pontos regular com uma equidistância ortogonal de 100 metros (num total de 3451 pontos), a partir dos quais foram apreendidos os valores de altitude cada um dos MDE e comparados os valores com o MDE de referência.

Os resultados representados graficamente na figura 44 demonstram que, considerando as diferenças encontradas, o MDE ALS 2x2, com um coeficiente de correlação linear (R^2) de 1, apresenta uma correlação absoluta, enquanto o MDE BTN 10x10 é o que mais se afasta (0,9971), estando os resultados de acordo com o expectável, já que o primeiro dos modelos referidos e o MDE de referência foram elaborados a partir da mesma informação de base.

Nas diferenças verificadas e em relação aos MDE com a mesma resolução (5 metros), o que mais se aproxima do MDE de referência é o MDE PNOA 5x5 ($R^2=0,9999$). No entanto, os elevados valores apresentados pelo coeficiente de correlação linear (R^2) revelam que a distribuição das altitudes apresenta a mesma tendência, como não poderia deixar de ser, uma vez que se trata da mesma área de estudo.

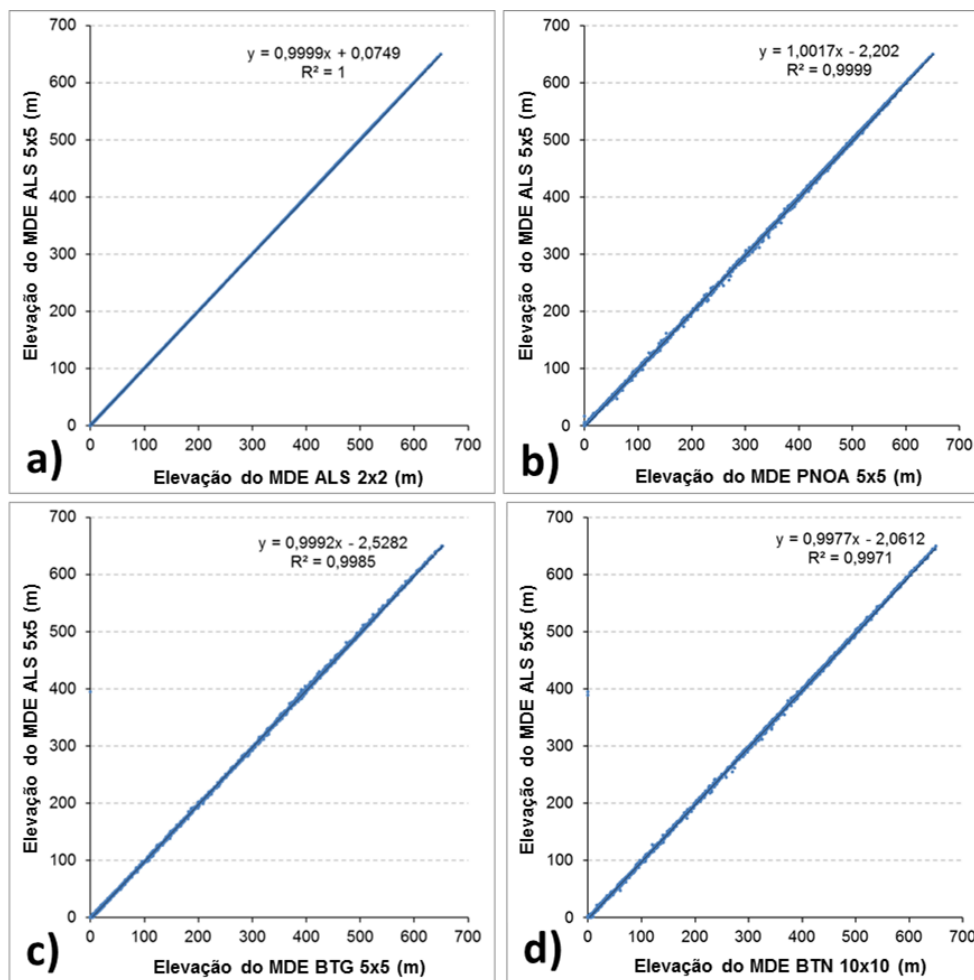


Figura 44- Gráficos de correlação entre os MDE.

a) MDE ALS 5x5 vs MDE ALS 2x2; b) MDE ALS 5x5 vs MDE PNOA 5x5; c) MDE ALS 5x5 vs MDE BTG 5x5; d) MDE ALS 5x5 vs MDE BTN 10x10.

O cálculo do EMQ efetuado para os valores de altitude apresentados pelos diferentes MDE na área de estudo, considerando a malha de pontos, demonstra de forma mais clara as diferenças já constatadas com os pontos recolhidos com GPS (Tabela 26). Ou seja, o MDE BTN 10x10 apresenta as maiores diferenças ao nível da altitude e, de entre os MDE com a resolução de 5 metros, é o MDE PNOA 5x5 que apresenta a maior proximidade com o de referência, o MDE ALS 5x5.

MDE	Diferenças de altitude (malha de pontos)				EMQ
	Máximo	Amplitude	Média	Desvio padrão	
MDE ALS 2x2	7,74	17,70	-0,16	0,663045	0,602733
MDE PNOA 5x5	40,01	83,19	1,42	2,207521	2,325214
MDE BTG 5x5	20,18	43,27	2,78	1,765894	3,211252
MDE BTN 10x10	25,36	36,52	3,36	2,356399	4,019203

Tabela 26- Diferenças de altitude e EMQ entre o MDE de referência (MDE ALS 5x5) e os restantes MDE

Note-se, na análise das diferenças, que os valores mais elevados registados pelo MDE PNOA 5x5, ao nível do valor máximo e da amplitude de valores, não significam maiores EMQ,

uma vez que são o resultado de maiores diferenças registadas num reduzido número de casos relacionados com situações anómalas.

Analisando características gerais, no que concerne à altitude e aos declives (Tabela 27), as diferenças entre MDE não são muito significativas, especialmente as que são apresentadas pelos três modelos com 5 metros de resolução espacial.

MDE	Parâmetro	Min	Max	Amplitude de valores	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
MDE ALS 2x2	Altitude (m)	-1,46	652,53	653,99	337,88	178,95	0,53
	Declive (°)	0,00	70,95	70,94	13,29	9,88	0,74
MDE ALS 5x5	Altitude (m)	-1,46	652,49	653,94	337,97	178,93	0,53
	Declive (°)	0,01	62,33	62,32	13,02	9,36	0,72
MDE PNOA 5x5	Altitude (m)	0,00	652,74	652,74	340,75	178,60	0,52
	Declive (°)	0,00	75,24	75,24	12,79	9,56	0,75
MDE BTG 5x5	Altitude (m)	0,00	655,43	655,43	340,88	178,88	0,52
	Declive (°)	0,00	63,29	63,29	12,43	9,19	0,74
MDE BTN 10x10	Altitude (m)	0,00	653,58	653,58	342,33	178,82	0,52
	Declive (°)	0,00	52,92	52,92	12,02	9,10	0,76

Tabela 27- Comparação entre os valores de altitude e declives para os diferentes MDE

Em relação à altitude e no que diz respeito às medidas que analisam a dispersão dos dados (desvio padrão e coeficiente de variação), os valores apresentam diferenças muito reduzidas, indiciando, mais uma vez, que as variações de altitude, em traços gerais, se registam da mesma forma.

Ao nível da altitude média, as variações nos resultados denotam, contudo, algumas diferenças assinaláveis, atingindo a diferença máxima entre o MDE BTN 10x10 e o MDE ALS 2x2 o valor de 4,45 metros, ficando-se a diferença máxima entre os três MDE de 5 metros de resolução pelos 2,91 metros, entre os MDE BTG 5x5 e o MDE ALS 5x5. Estes valores denotam claramente uma tendência: o facto de se verificar uma diminuição do valor médio de altitude à medida que se aumenta a resolução do MDE.

Ao nível da altitude máxima e da amplitude, a magnitude de valores é semelhante e perto dos 3 metros, registando-se, em ambos os casos, entre os MDE BTG 5x5 e o MDE PNOA 5x5. Não se trata, uma vez mais, de valores de grande magnitude, mas de valores que deixam transparecer diferenças entre os valores de altitude.

Ao nível dos declives, as diferenças de valores não são muito significativas, à exceção dos valores máximos e da amplitude dos mesmos. Nestes casos, a diferença entre os MDE atinge valores na ordem dos 22°, variando entre os 75,24° do MDE PNOA 5x5 e os 52,92° do MDE BTN 10x10. Estes valores demonstram necessariamente, a existência de grandes diferenças na representação dos declives.

As diferenças existentes entre os produtos gerados pelos MDE ultrapassam, de certa forma, a análise destas relações numéricas gerais e podem ser inferidas pela análise visual dos

mesmos, tal como se verá nas páginas seguintes. Um dos aspetos em que mais se constata o contraste entre os MDE, prende-se com as diferenças demonstradas na apreensão da morfologia através da visualização e análise do relevo pelo modelo sombreado (Figura 45).

Torna-se evidente uma diferença clara nos vários sombreados do relevo elaborados. A primeira tendência verificada é que a melhoria da resolução significa uma melhoria do detalhe da imagem resultante e, conseqüentemente, uma melhor representação do relevo. Tal facto, só é possível no caso da resolução de 2 metros, porque a informação de base apresenta qualidade suficiente, quer ao nível altimétrico, quer ao nível da densidade de dados.

Outro aspeto muito relevante é a diferença de resultados entre os MDE que têm a mesma resolução (5 metros), tornando-se novamente evidente que o sombreado do relevo do ALS é aquele que melhor apreende a morfologia do terreno. Uma análise mais pormenorizada, permite afirmar que os sombreados derivados do ALS, em especial o de 2 metros de resolução, se distinguem claramente dos restantes, uma vez que os pormenores que apresentam não surgem nos restantes. Um aspeto muito saliente reside na forma como conseguem apreender os socacos existentes nas vertentes, demonstrando uma semelhança notável com a delimitação das áreas de cultivo observável no ortofotomapa (Figura 45).

Na representação das vertentes, as diferenças são notórias e a vegetação existente parece não ter influenciado negativamente a captação dos pormenores existentes nos MDE derivados do ALS, ao contrário dos outros modelos, nos quais, embora se observe a configuração geral das vertentes, estas não são tão claramente representadas, já que não apresentam o mesmo rigor. Ao longo das vertentes, este aspeto é particularmente visível na delineação dos cursos de água e valeiros, que se encontram representados de forma notável, mostrando-se as linhas de escoamento de forma bastante clara e bem definida.

Observe-se a figura 46 que representa um perfil topográfico traçado junto da foz do rio de Mougás. Pela análise dos perfis traçados a partir de cada um dos diversos modelos, facilmente se constata não só importantes diferenças ao nível da altitude, mas também grandes diferenças de representação dos leitos/margens dos rios, *i.e.*, na morfologia dos vales. Os MDE derivados do ALS definem formas muito mais aproximadas da realidade, especialmente o MDE ALS 2x2, ao passo que os MDE PNOA 5x5 e MDE BTN 10x10 quase que não representam o leito do rio. Mesmo considerando apenas os MDE com a resolução de 5 metros, as diferenças são muito significativas.

Outro aspeto de enorme relevância é a demarcação das estradas, caminhos e aceiros florestais, que apenas são visíveis nos MDE derivados do ALS, facto que demonstra, uma vez mais, a sua capacidade extraordinária de aquisição de aspetos de pormenor da morfologia.

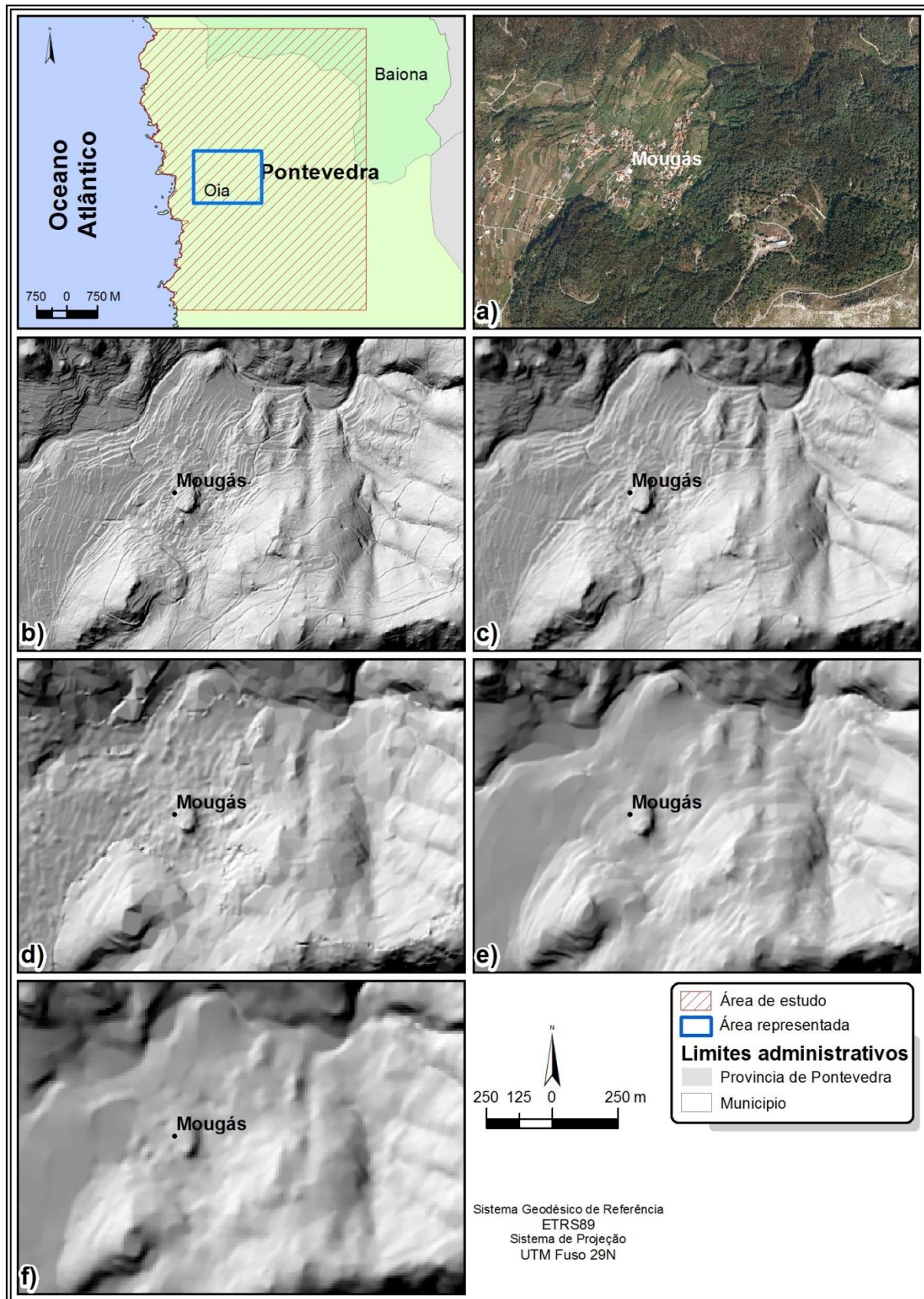


Figura 45- Ortofotomapa e sombreados de relevo obtidos a partir dos diferentes MDE, elaborados para um setor da área de estudo.

a) Ortofotomapa; **b)** Sombreado do relevo obtido a partir do MDE ALS 2x2; **c)** Sombreado do relevo obtido a partir do MDE ALS 5x5; **d)** Sombreado do relevo obtido a partir do MDE PNOA 5x5; **e)** Sombreado do relevo obtido a partir do MDE BTG 5x5; **f)** Sombreado do relevo obtido a partir do MDE BTN 10x10

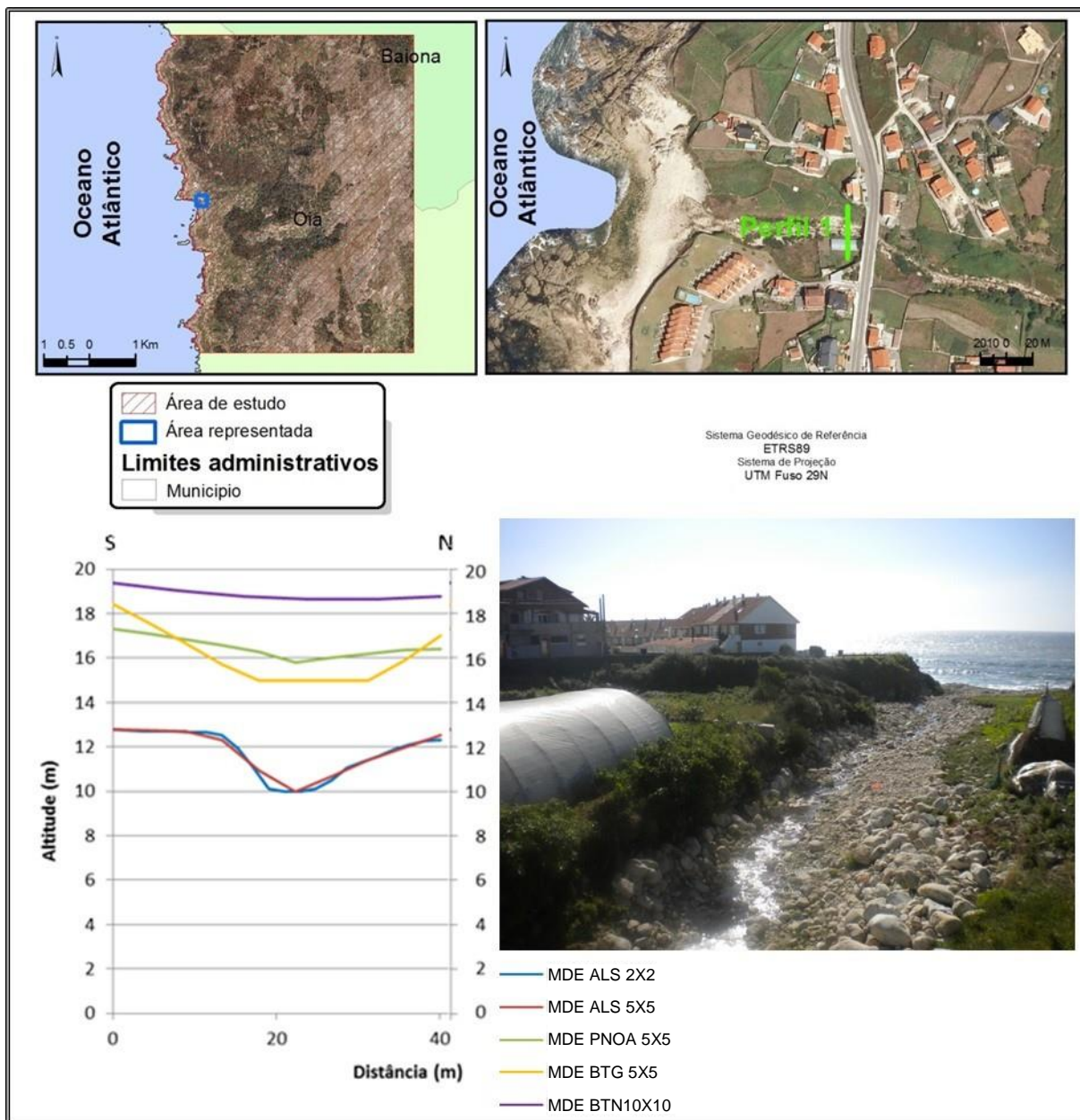


Figura 46- Perfil topográfico junto à foz do rio Mougás, localização e fotografia (perspetiva de este)

Um olhar mais pormenorizado sobre as características apresentadas pelos declives permite constatar quem, na área, e para todos os MDE, a tendência geral é de maior significado dos menores declives, até os 15°, sendo a classe [5–10°] a que apresenta os valores mais significativos (Tabela 28). As classes referentes aos declives mais elevados apresentam valores mais reduzidos, o que se coaduna com as características aplanadas apresentadas nos setores mais a este e oeste da área de estudo.

A comparação da importância de cada classe de declives entre os mapas de declives elaborados a partir dos diferentes MDE mostra uma tendência interessante: nas classes de declives $\leq 5^\circ$ e [5°–10°], o MDE BTN 10x10 regista os valores mais elevados; nas classes de [10°–15°] e [15°–20°], os valores mais elevados pertencem ao MDE PNOA 5x5; nas classes

[20°–25°] e [25°–30°], os valores mais elevados pertencem ao MDE ALS 5x5; e na classe > 30°, o valor mais elevado pertence ao MDE ALS 2x2.

Declives (°)	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
≤ 5	20,1	19,1	19,7	20,7	22,2
]5 - 10]	27,3	28,9	29,0	30,5	31,3
]10 - 15]	18,9	19,5	19,9	18,5	17,8
]15 - 20]	10,3	10,2	10,9	9,4	9,1
]20 - 25]	7,3	7,3	7,3	6,9	6,9
]25 - 30]	7,4	7,5	5,9	7,2	6,2
> 30	8,7	7,5	7,4	6,7	6,4

Tabela 28- Declives (°) por classe e MDE

Trata-se de uma tendência que na nossa opinião se relaciona com quatro aspetos: primeiro, a tendência de maior generalização da informação da altitude associada à informação do MDE BTN 10x10; segundo, a maior capacidade de apreensão dos detalhes da morfologia registado pelos MDE derivados do ALS, que explica a existência de maior número de pequenas áreas com declives mais acentuados, aumentando os valores destas classes; terceiro, quando comparados os MDE com resolução de 5 metros, verifica-se uma melhor capacidade de apreensão dos pormenores por parte dos MDE ALS 5x5 em comparação com os outros dois, em especial com o MDE BTG 5x5; quarto, e continuando a confirmar as interpretações do sombreado de relevo, a maior capacidade de apreensão dos pequenos detalhes na morfologia apresentados pelo MDE ALS 2x2.

Estes factos tornam-se evidentes na análise visual, quando se comparam os declives na mesma área (Figura 48).

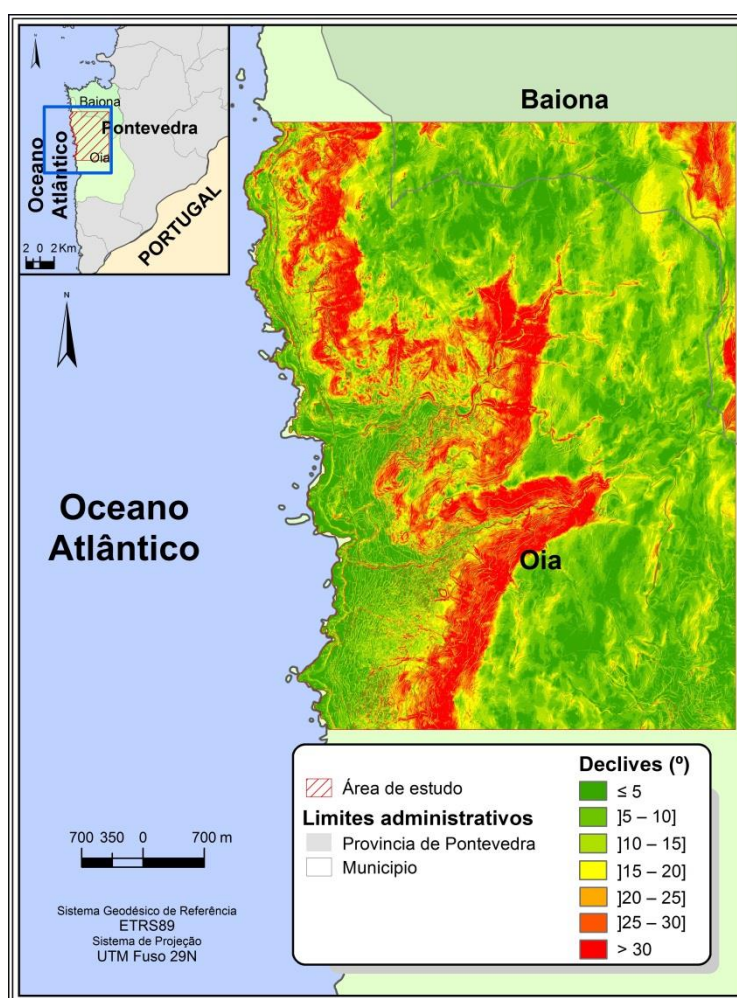
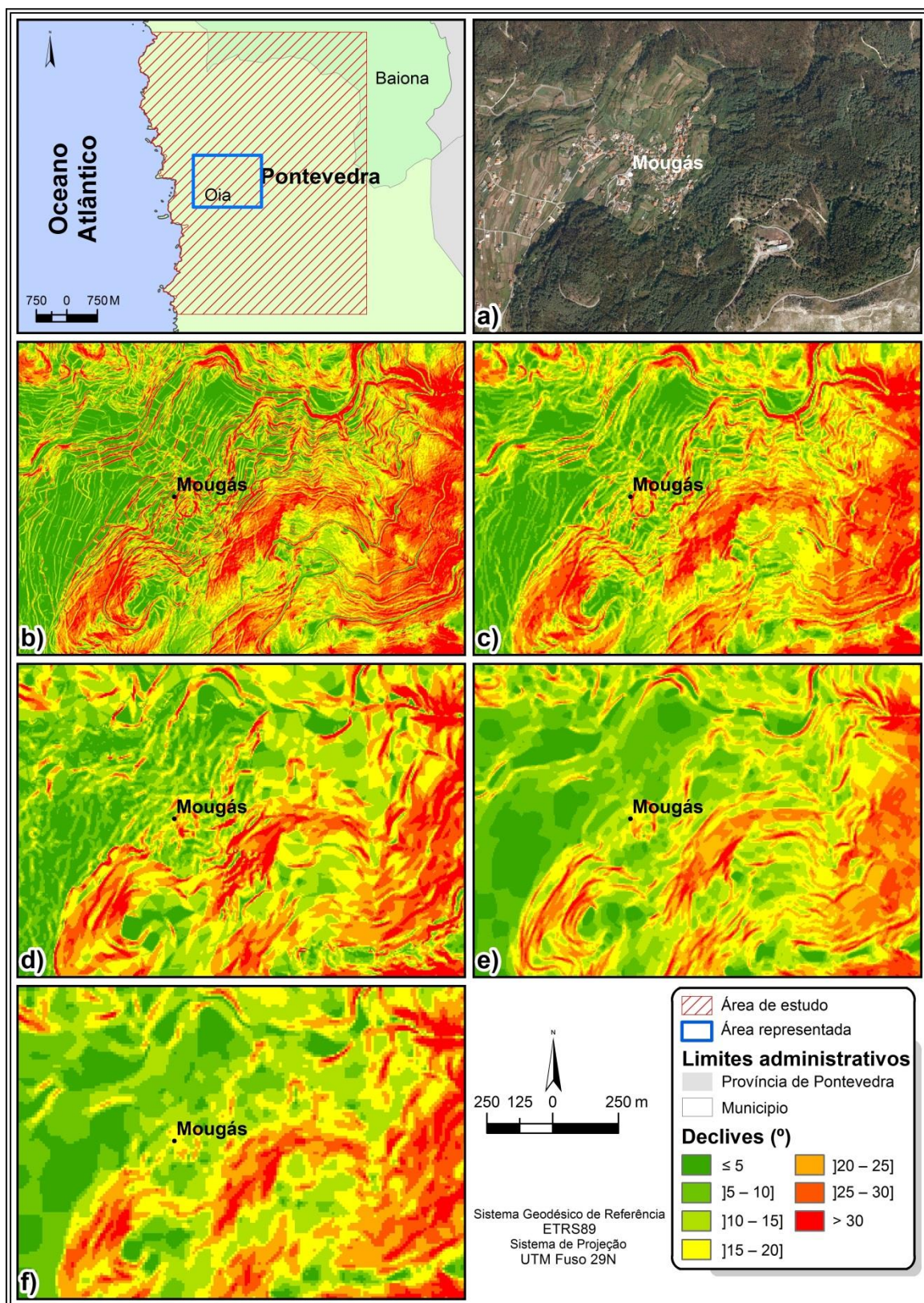


Figura 47- Carta de declives baseada no MDE ALS 2x2



declives mais fracos, assim como os pequenos topos e rechãs localizadas ao longo das mesmas; nas encostas das elevações da área, os declives apresentam-se bastante acentuados, relacionando-se com os fortes desníveis altimétricos que estas apresentam.

No entanto, o pormenor verificado na informação proveniente dos MDE derivados do ALS permite detetar diferenças visuais claras em relação à quantidade de áreas classificadas com declives mais elevados, assim como permite definir esses mesmos declives com grande pormenor, seja na transição dos socacos, no encaixe das linhas de água ou na delimitação das estradas. As estradas, caminhos florestais ou aceiros, surgem individualizados, não só pelos declives acentuados, que nalguns casos as envolve, mas também pela existência de declives pouco acentuados ao longo do seu percurso, o que contrasta fortemente com a envolvente, facto especialmente evidente no MDE ALS 2x2.

Contraste evidente, existe, também, no pormenor apresentado pelos mapas elaborados com base nos dados do ALS, quando comparados com as generalizações efetuadas pelos restantes, mesmo que cotejados somente os mapas com base nos MDE com a mesma resolução.

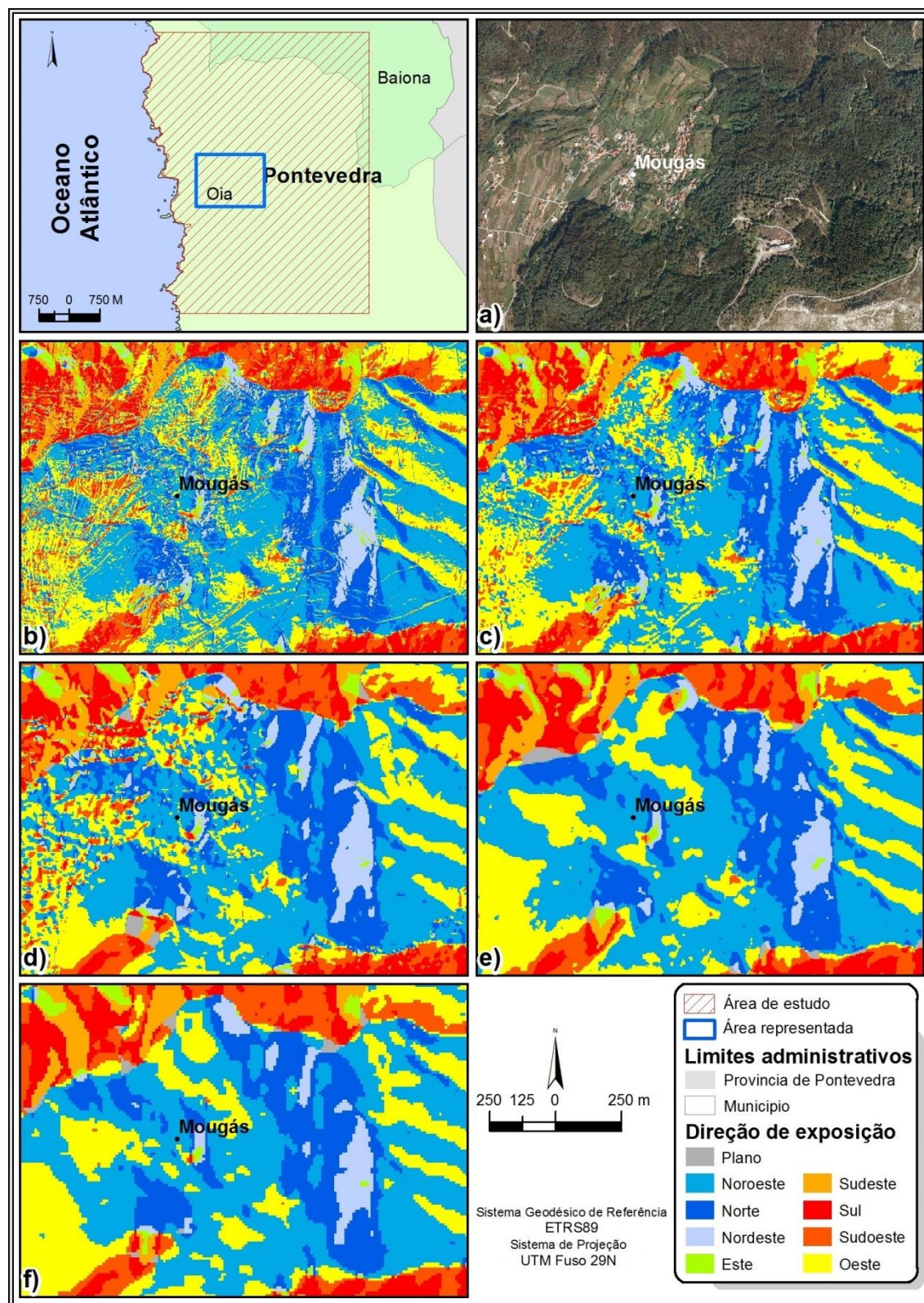
Na análise das exposições das vertentes, todos os mapas revelam, na generalidade, as mesmas tendências, quer numa análise por quadrantes, quer por octantes (Tabelas 29 e 30). A maior parte da área – sensivelmente metade – encontra-se exposta ao quadrante oeste ou aos octantes a si associados (SO, O e NO).

	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
Plano	0,0	0,0	1,0	1,1	0,9
N	17,5	16,9	17,1	15,8	15,3
E	16,4	16,2	15,6	15,0	14,7
S	21,2	20,9	21,5	20,9	21,3
O	44,9	46,1	44,8	47,2	47,7

Tabela 29- Distribuição das exposições obtidas a partir dos MDE por quadrantes

	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
Plano	0,0	0,0	1,0	1,1	0,9
N	7,1	6,6	6,9	6,2	5,9
NE	6,1	5,9	5,9	5,1	5,5
E	8,2	8,0	7,8	7,6	7,3
SE	9,8	9,8	9,4	9,4	9,0
S	10,2	10,0	10,5	10,3	10,4
SO	14,4	14,2	14,0	13,7	14,1
O	24,6	25,4	24,8	26,4	26,8
NO	19,8	20,2	19,8	20,0	20,1

Tabela 30- Distribuição das exposições obtidas a partir dos MDE por octantes



quadrantes, os valores apresentados pelos mapas de exposições do MDE ALS 2x2 e MDE BTN 10x10 registam diferenças nos quadrantes norte, este e oeste de 2 a 3%. Já as diferenças registadas entre os mapas derivados dos MDE com a resolução de 5 metros são menos significativas, o que nos indica que as razões das primeiras diferenças se prendem, sobretudo, com a resolução.

Tal facto continua a não revelar as diferenças existentes ao nível da distribuição dos valores e do pormenor representado pelos produtos finais.

A figura 49 demonstra o maior detalhe que é possível obter com os modelos derivados dos dados ALS. Comparando os produtos derivados dos MDE com resolução de 5 metros, constata-se que o mapa derivado do MDE BTG 5x5 apresenta grandes áreas com a mesma exposição, ou seja, grandes áreas uniformes, que desaparecem nos mapas derivados dos MDE PNOA 5x5 e MDE ALS 5x5.

É de salientar, também, que a informação representada nos mapas obtidos a partir dos MDE BTN 10x10 e MDE BTG 5x5 apresentam bastantes semelhanças, exibindo o segundo, maior detalhe na representação, continuando, no entanto a patentear resultados muito generalizados em comparação com os resultados ALS. Este é um facto que comprova o afastamento da qualidade do segundo modelo face aos outros com a mesma resolução.

Analisando de forma mais pormenorizada um pequeno setor da área de estudo, designado por setor A (Figura 50), é possível conferir estas ilações e deduzir ainda outras. O setor foi selecionado por apresentar características morfológicas típicas da área, iniciando-se numa área alta mais aplanada (a este), alongando-se para oeste/noroeste numa vertente com fortes declives, até encontrar uma área mais aplanada e baixa que se estende até junto da linha de costa. Afere-se, desta forma, a capacidade dos dados ALS na interpretação da morfologia da área, numa análise a grande escala.



Figura 50- Localização do Setor A e pormenor dessa área no ortofotomapa.

Neste caso, utilizaram-se como base de comparação os MDE elaborados com a resolução de 5 metros, por três motivos essenciais: primeiro, pela já confirmada fraca capacidade de representação do MDE BTN 10x10, quando comparado com os restantes; segundo, pelo facto de as comparações entre as mesmas resoluções se demonstrarem mais fáceis, não se inserindo fatores perturbadores; por fim, por uma questão de visualização, uma vez que a representação conjunta dos vários MDE colide com a escala possível de representar, dadas as restrições do trabalho em questão.

Com tal opção não se pretende reduzir a análise a estes, já que o MDE ALS 2x2 é utilizado, embora numa ótica de verificação da melhoria de representação em relação ao MDE ALS 5x5.

A análise dos sombreados de relevo (Figura 51) é, novamente, bastante reveladora das diferenças, permitindo inferir imediatamente as diferenças de captação da morfologia e das infraestruturas. Elementos como os topos, vales, estradas, caminhos, aceiros e socos, surgem todos mais bem definidos no MDE ALS 5x5.

Notem-se, em particular, os pormenores verificados ao longo da vertente, onde o MDE ALS 5x5 apresenta um conjunto de variações muito significativas, possivelmente associadas ao processo de evolução da morfologia da área, enquanto os restantes apenas esboçam as grandes tendências, cuja representação é, por vezes, influenciada negativamente pela ação humana, nomeadamente, através da construção de estradas, como é possível verificar na parte nordeste do setor no MDE PNOA 5x5.

Análise semelhante é possível na visualização dos sombreados de relevo a 2,5D, patentes na figura 52, especialmente se tivermos em consideração a fotografia da área apresentada. Se as grandes linhas morfológicas são captadas pelos diferentes modelos, os aspetos de pormenor apenas são

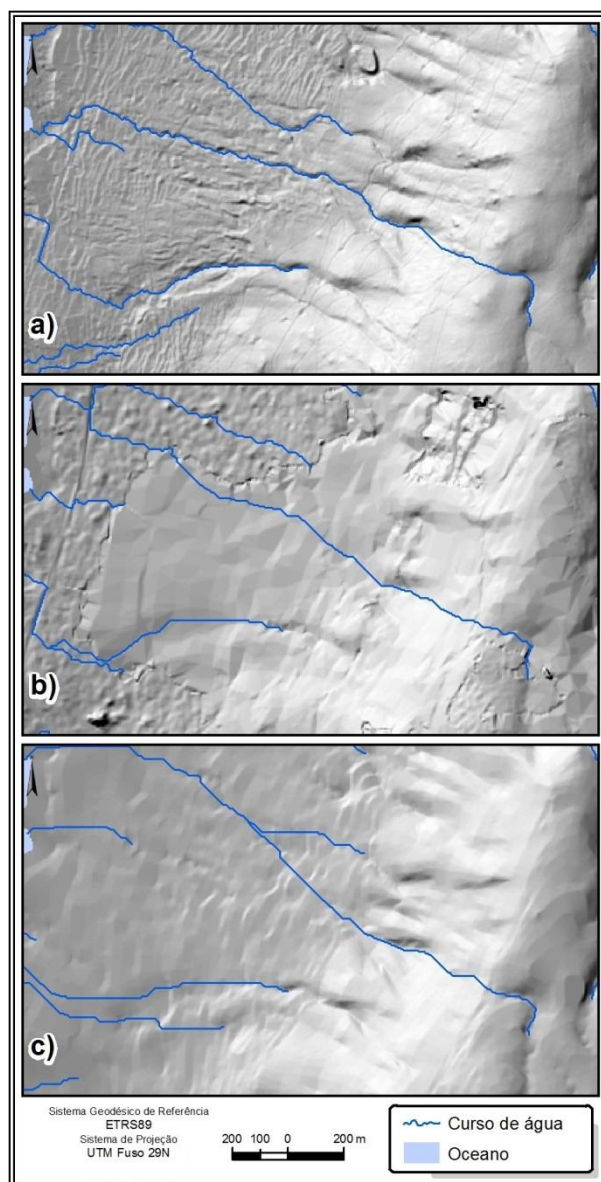


Figura 51- Sombreados de relevo do setor A.

a) Obtido a partir do MDE ALS 5x5; b) Obtido a partir do MDE PNOA 5x5; c) Obtido a partir do MDE BTG 5x5.

verdadeiramente captados pelos MDE derivados do ALS. Estes factos são bem visíveis na área mais aplanada, na vertente mais declivosa e no encaixe dos cursos de água, particularmente evidentes nas encostas e na parte inferior da imagem, onde o vale do curso de água surge perfeitamente delineado nos MDE ALS 2x2 e 5x5, não sendo, todavia, visível nos outros dois.

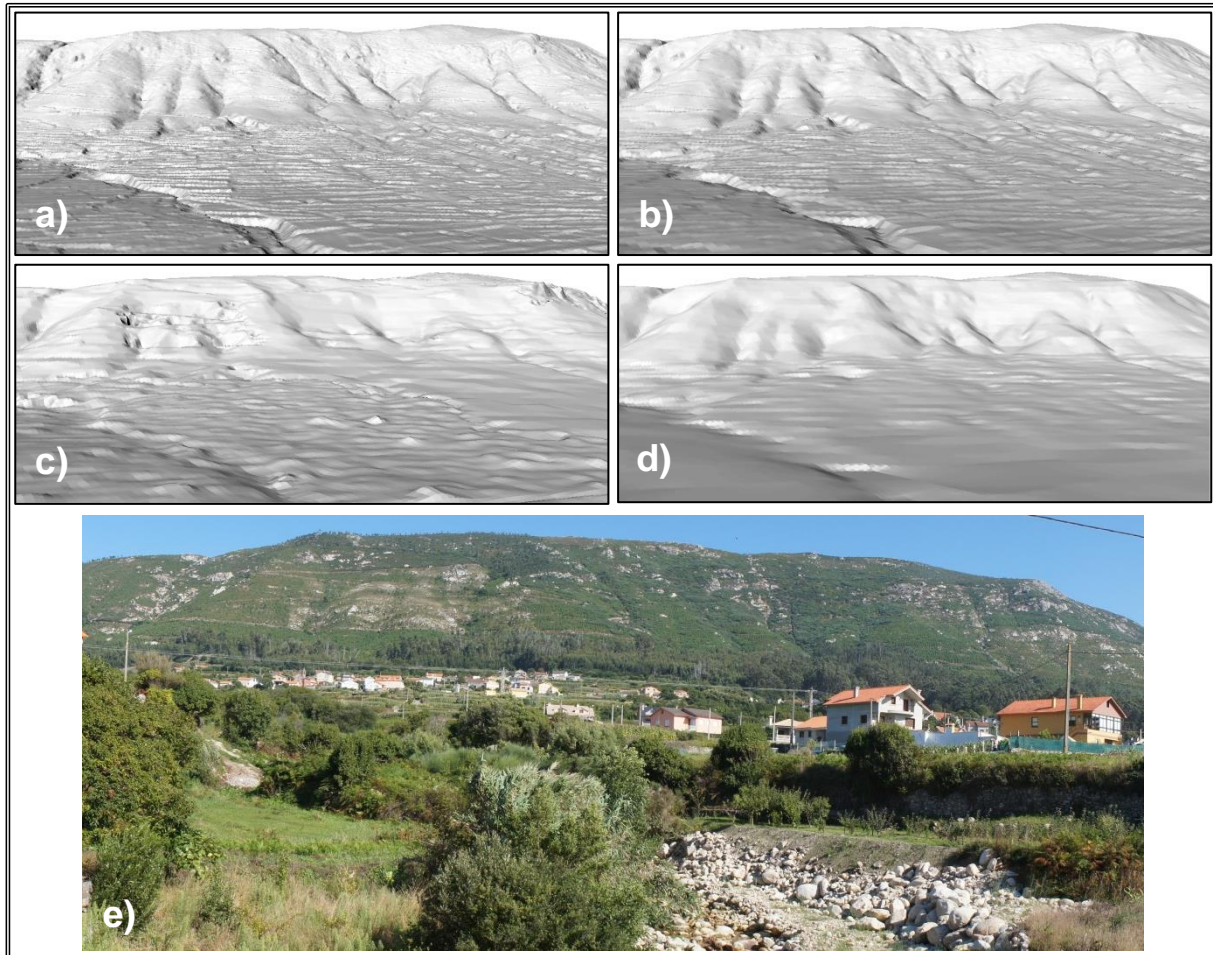


Figura 52- Perspetiva 2,5D dos sombreados de relevo e fotografia do setor A (Perspetiva de ONO).

a) Obtido a partir do MDE ALS 2x2; b) Obtido a partir do MDE ALS 5x5; c) Obtido a partir do MDE PNOA 5x5; d) Obtido a partir do MDE BTG 5x5; e) Fotografia do local.

Há uma diferença que se torna clara, revelando uma grande vantagem do ALS em relação aos meios fotogramétricos. Na área que apresenta mais vegetação de grande porte, sensivelmente ao centro da figura, os MDE derivados do ALS foram capazes de representar mais fielmente a morfologia do que os restantes.

As mesmas tendência revelam-se, obviamente, na definição dos declives, onde as consequências na apreensão da morfologia podem ser muito significativas.

Claramente, quando comparados com os restantes (Figura 53), o MDE BTG 5x5, indica uma vertente mais suave, pautada por faixas de vertente com diminuições significativas no declive ao longo da mesma. No MDE PNOA 5x5 continua a verificar-se uma clara distorção da

morfologia pela influência da ação humana, enquanto através do MDE ALS 5x5 é possível identificar pequenas áreas aplanadas que corresponderão a pequenas rechãs.

A definição da base da vertente (mudança brusca no valor do declive) faz-se de forma também diferente, sendo mais precisa e facilitada pela análise do MDE ALS 5x5.

Obviamente, tais factos revelam-se também na análise da morfologia ao longo de perfis topográficos. Estas representações confirmam, novamente, as interpretações anteriores, embora as tendências gerais do relevo se mantenham, já que a apreensão dos pormenores da morfologia é mais bem conseguida com o MDE derivado do ALS.

Todos os perfis representados nas figuras que se seguem (Figuras 54, 55, 56 e 57), demonstram diferenças sensíveis na aferição da altitude. Tal facto, é visível não só nos próprios perfis (à exceção do perfil n.º 1, devido ao seu comprimento e escala de representação), mas especialmente nos gráficos ilustrativos das diferenças para o MDE de referência (MDE ALS 5x5). No caso do MDE PNOA 5x5, esta diferença ultrapassa mesmo os 15 metros de altitude.

Será de realçar, também que, na generalidade dos casos, o MDE ALS 5x5 apresenta valores de altitude mais baixos, o que permite presumir, novamente, a influência que a vegetação implica na má aferição da altitude nos restantes MDE.

Os perfis 2 e 3 (Figuras 55 e 56), situados a meio da encosta, no setor de maior declive, demonstram claramente a melhor definição da morfologia por parte do MDE ALS 5x5, definindo claramente os canais de escoamento e demonstrando que se tratam de vales rasgados muito típicos de escoamentos torrenciais, características que são confirmadas pela fotografia da

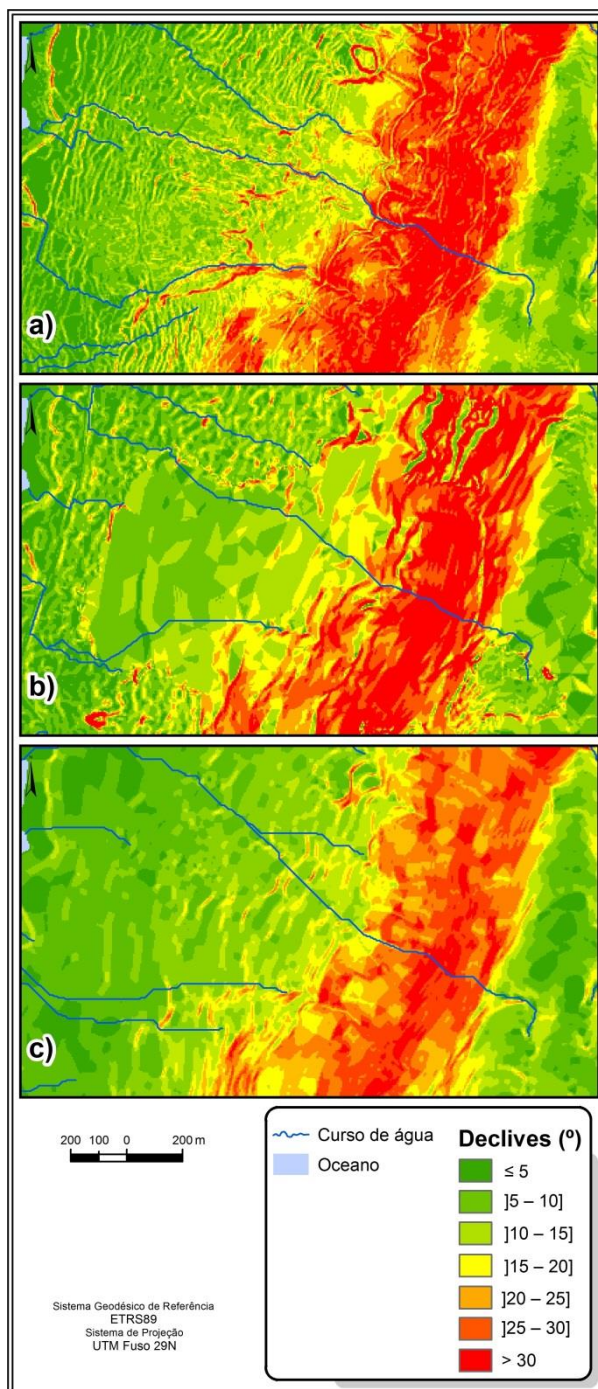


Figura 53- Declives do setor A.

a) Obtidos a partir do MDE ALS 5x5; b) Obtidos a partir do MDE PNOA 5x5; c) Obtidos a partir do MDE BTG 5x5

figura 57 e pela volumetria dos blocos encontrados no leito/margens do rio numa área mais a jusante do seu curso.

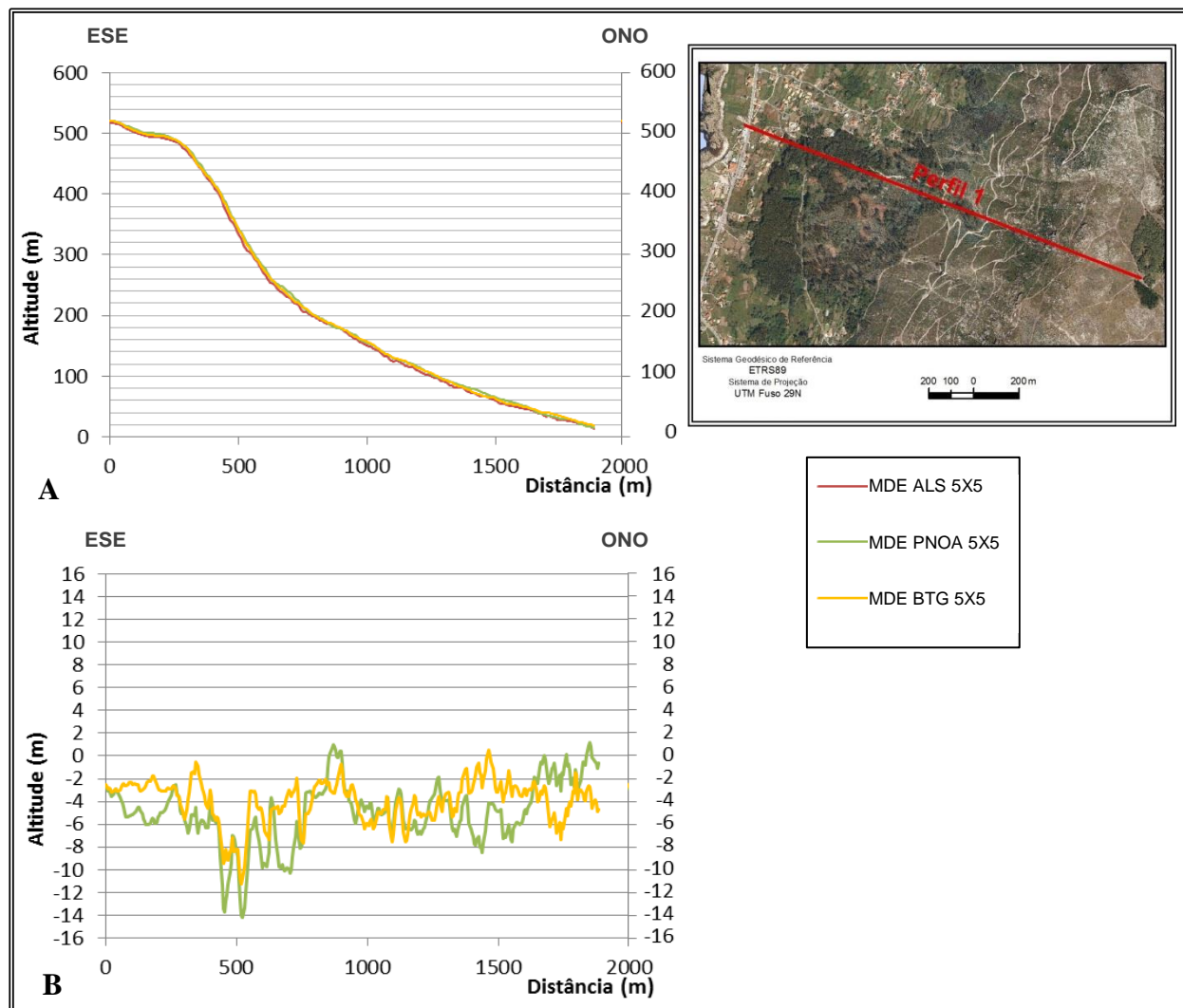


Figura 54- Perfil topográfico 1 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)

O perfil 4 (Figura 57), será, porventura, aquele que apresenta maiores diferenças em termos de representação da morfologia. Este perfil localiza-se numa área mais aplanada e, portanto, tendencialmente alvo de deposição de sedimentos provindos das encostas, apresentando uma variação da altitude que define lombas sucessivas de pequena altitude. No caso do MDE ALS 5x5, ele indica claramente a existência de múltiplos canais de escoamento separados por áreas de acumulação de sedimentos (Figura 58), facto que é parcialmente confirmado na fotografia da figura 59. Nos restantes dois, esta morfologia importante de incisão, aparece muito suavizada (impercetível, quase) e com diferenças significativas, especialmente no caso do MDE PNOA 5x5.

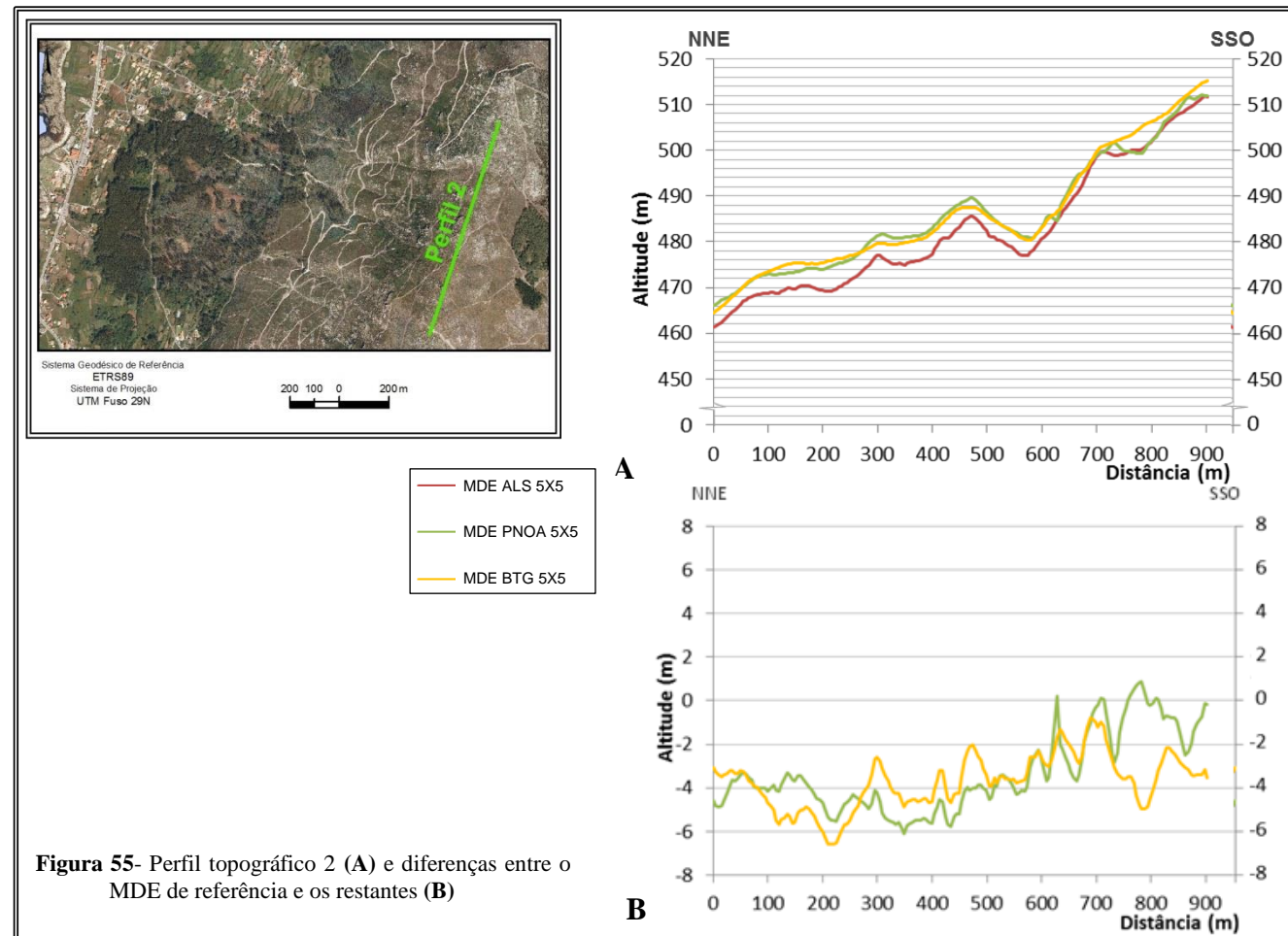


Figura 55- Perfil topográfico 2 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)

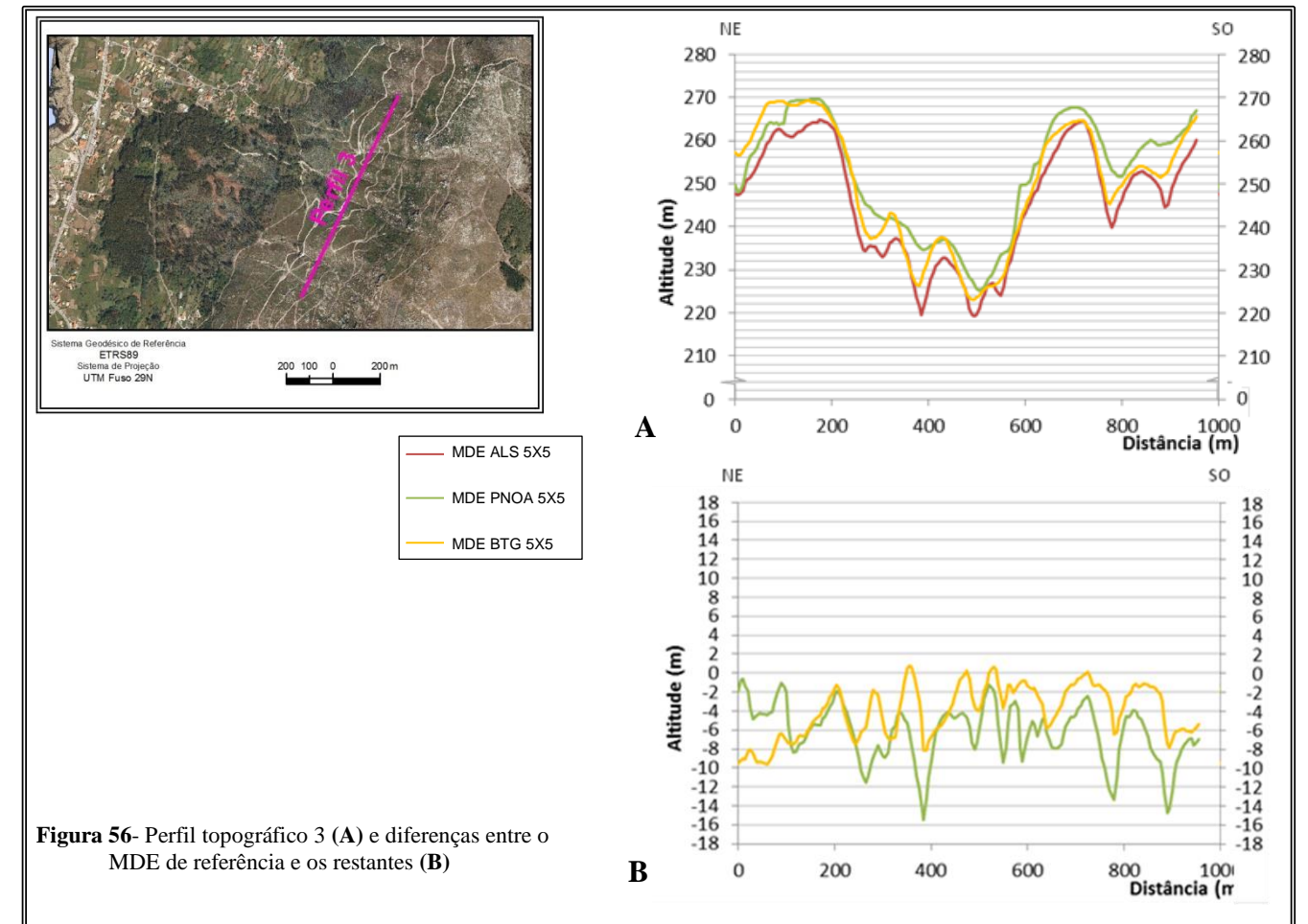


Figura 56- Perfil topográfico 3 (A) e diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B)

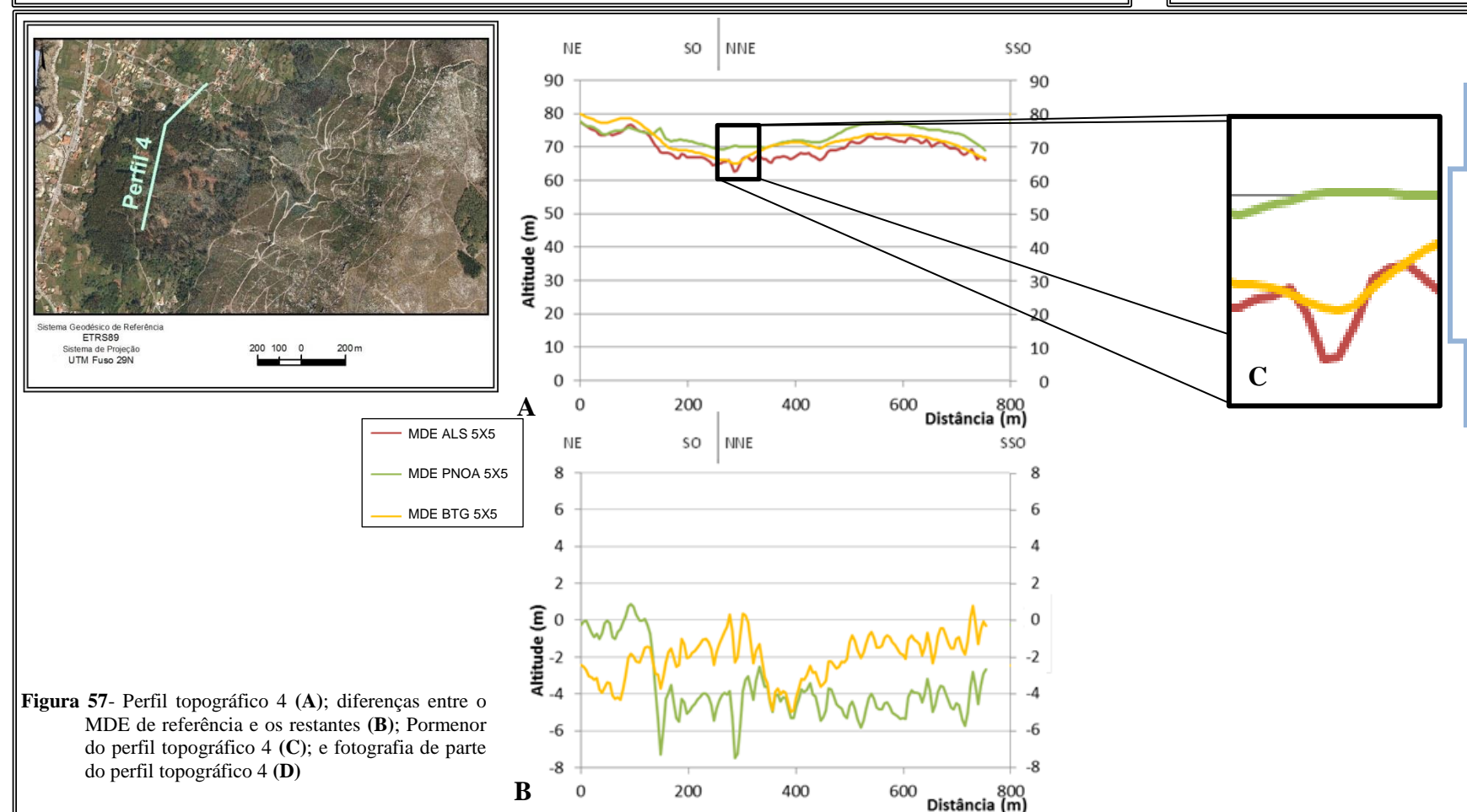


Figura 57- Perfil topográfico 4 (A); diferenças entre o MDE de referência e os restantes (B); Pormenor do perfil topográfico 4 (C); e fotografia de parte do perfil topográfico 4 (D)

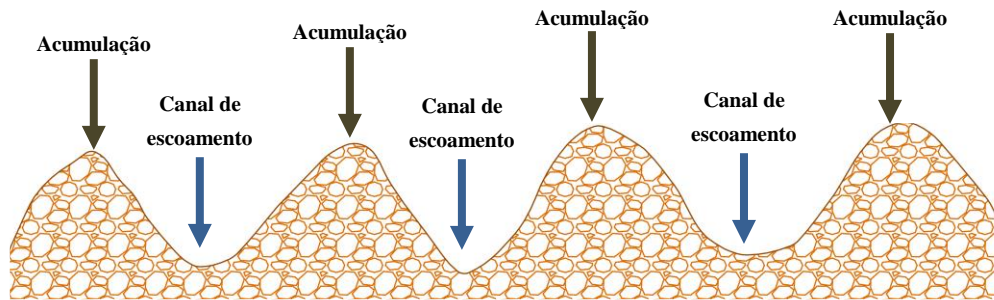


Figura 58- Esquema interpretativo da morfologia do terreno ao longo do perfil n.º 4.



Figura 59- Exemplo de uma área de acumulação de sedimentos ao longo do perfil n.º 4

Um caso sintomático que expõe as desiguais apropriações das diferenças altimétricas é apresentado no perfil 4, onde o MDE PNOA 5x5 nem sequer representa o leito do ribeiro individualizado (Figura 57 C), representando-o o MDE BTG 5x5 de uma forma muito suavizada, bastante diferente da representação no MDE ALS 5x5 e do que se verifica na realidade observada no campo.

Como se constata, a informação apresentada para o setor permite interpretar a morfologia da área com diferenças significativas, podendo, nalguns casos, originar conclusões finais diferentes, consoante o fim a que destine o estudo.

4.4.2. A hidrografia

A análise comparativa efetuada na questão hidrográfica baseou-se, sobretudo, numa análise da morfometria, dividida em três partes: análise hipsométrica, relacionada com as características do relevo da bacia hidrográfica; análise linear, relacionada com os aspetos da rede hidrográfica; e análise areal, relacionada com a geometria da bacia hidrográfica, utilizando-se exemplos de pormenor, sempre que se afiguraram como relevantes.

Embora tivessem sido calculada a generalidade dos parâmetros utilizados neste tipo de abordagem, na análise efetuada, nem sempre foram usados todos os parâmetros, essencialmente por uma questão de relevância dos mesmos e pela sua elevada quantidade e diversidade.

Como referido anteriormente, a análise subordinou-se, em grande parte, à principal bacia hidrográfica da área de estudo – do rio Mougás – dado que se presume que esta refletirá, de forma capaz, todas as diferenças que possam existir na utilização dos diferentes MDE para o estudo da hidrografia.

De referir, mais uma vez, que a geração da rede e bacias hidrográficas foi totalmente automática, tendo sido efetuada como recurso à caixa de ferramentas *Arc Hydro Tools* do *software* ArcGIS® e como tal livre de interferência humana.

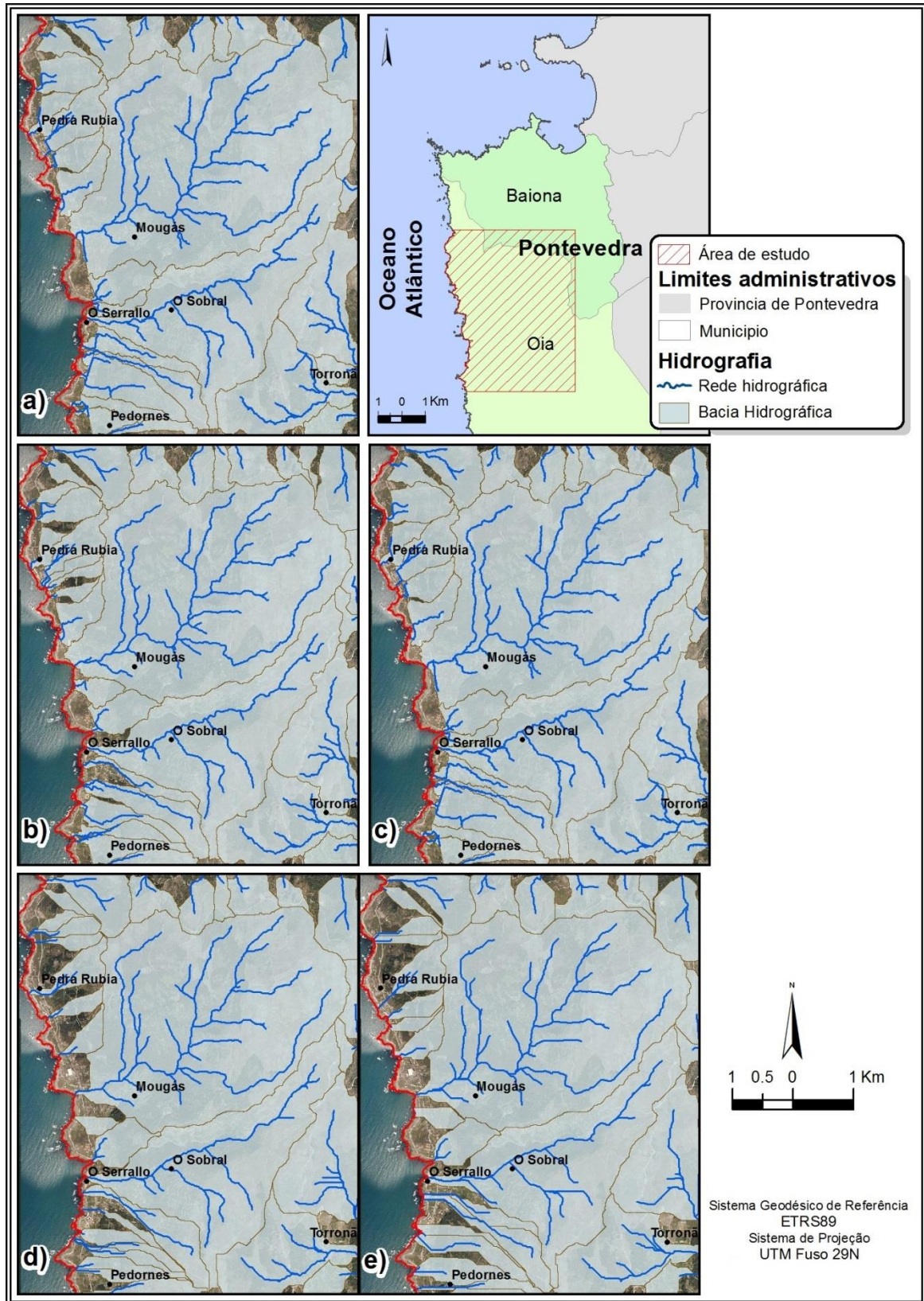
Relembrando o objetivo é avaliar a capacidade de cada um dos modelos por si só, de contribuir para o estudo da hidrografia e aspetos relacionados. Sendo assim, além da comparação produtos derivados dos diferentes modelos, alguns elementos, como as questões do traçado, serão comparados com o que se encontra representado na cartografia oficial à escala 1:5000 e 1:25000.

De forma prévia, importa analisar os resultados da geração automática das redes e bacias hidrográficas para a totalidade da área de estudo (Figura 60 e Tabela 31).

Genericamente, as diferenças mais marcantes verificam-se entre os dados gerados pelo MDE ALS 2x2 e o MDE BTN 10x10, fazendo-se assim sentir a diferença de resolução utilizada na captação da topografia, revelando-se mais uma vez, que a possibilidade demonstrada pelo ALS de atingir maiores resoluções tem como resultado melhores produtos.

Nos dados derivados dos MDE com a resolução de 5 metros, as diferenças fazem-se sentir, sobretudo, entre os MDE ALS 5x5 e MDE PNOA 5x5, face ao MDE BTG 5x5, já que os dois primeiros apresentam valores, globalmente, mais próximos. De entre os três, o MDE ALS 5x5 é o modelo que permitiu gerar um maior número de bacias hidrográficas, maior área total das bacias hidrográficas e maior comprimento da rede de drenagem. Seria de esperar que o MDE ALS 2x2 apresentasse valores semelhantes. Contudo, parece que a sua maior capacidade de aprender a rede hidrográfica, graças à sua melhor representação de pequenas variações na topografia, fez com que se verificasse uma alteração da delimitação das bacias hidrográficas,

especialmente junto à linha de costa, onde, de facto, se verificam menores variações topográficas.



	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
N.º de bacias	28	33	30	31	30
Área total das bacias (km ²)	31,94	32,22	32,18	30,45	30,77
Comprimento da rede de drenagem (Km)	73,48	71,36	68,64	64,90	62,65
N.º de segmentos	142	141	144	131	140
Segmento de menor comprimento (Km)	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Segmento de maior comprimento (Km)	3,65	4,30	4,35	4,03	3,91
Densidade de drenagem (Km/ Km ²)	2,30	2,21	2,133	2,132	2,04
Área da bacia maior	12,47	11,94	12,18	11,72	11,67
Área da bacia menor	0,16	0,13	0,14	0,13	0,12
Perímetro da bacia maior (Km)	22,79	20,41	21,33	19,08	18,18
Perímetro da bacia menor (Km)	2,14	2,75	2,39	2,96	3,72

Tabela 31- Características gerais da geração automática das redes e bacias hidrográficas para a área de estudo

Ao nível do traçado, o resultado obtido a partir do MDE BTG 5x5 assemelha-se mais ao obtido a partir do MDE BTN 10x10, apresentando maiores generalizações de traçado, quando comparado com os restantes, o que poderá associar-se à maior capacidade destes se apropriarem da morfologia da área.

Contudo, se os valores genéricos que caracterizam a rede hidrográfica poderão não apresentar diferenças significativas nalguns casos, já o traçado que deriva dos diferentes MDE apresentam diferenças sensíveis, facto que não é possível verificar na figura 60, dado que a escala de representação da figura, não permite depreender as diferenças e as redes não se encontram sobrepostas. Adiante, abordaremos o assunto.

Subordinando a lógica da análise apenas à maior bacia hidrográfica da área, que corresponde ao rio de Mougás, com a localização referida na figura 32, é possível verificar algumas conclusões interessantes, passíveis de serem extrapoladas para o resto da área.

Ao nível das características apresentadas pelo relevo (análise hipsométrica), as diferenças verificadas para a bacia hidrográfica não são muito diferentes do observado para a totalidade da área de estudo, ainda que, nalguns casos, se verifiquem algumas desigualdades.

Um dos exemplos onde se verificam diferenças, reside na análise da altitude máxima e média obtida pelos diferentes MDE (Tabela 32). Se os MDE derivados do ALS continuam a apresentar os valores mais baixos ao nível da altitude máxima, o mesmo já não se verifica nos valores mais elevados, que são os referentes ao MDE BTG 5x5 e ao MDE BTN 10X10. Da mesma forma, a altitude média mais baixa deixa de ser apresentada pelos MDE derivados do ALS e passa a pertencer ao MDE PNOA 5x5.

Tal facto, revela que, embora as tendências gerais sejam semelhantes, se verificam algumas diferenças na apreensão da topografia entre a totalidade da área de estudo e a bacia hidrográfica.

	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
Altitude máxima (m)	652,52	652,21	652,71	655,36	652,69
Altitude mínima (m)	-0,25	-0,23	0,00	0,07	0,00
Altitude média (m)	352,77	352,72	348,43	361,14	360,36
Altitude máxima do curso de água principal (m)	521,6	499,9	491,2	496,5	490,6
Altitude mínima do curso de água principal (m)	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0
Declive médio (°)	13,0	12,96	12,52	12,47	12,13
Declive máximo (°)	69,5	61,68	62,50	63,29	52,92
Declive mínimo (°)	0,004	0,02	0	0	0
Declive médio do curso de água principal (°)	0,076	0,081	0,084	0,087	0,089
Coefficiente de massividade	28,28	29,53	28,61	30,82	30,89
Coefficiente orográfico	9976,75	10417,37	9968,71	11129,43	11130,50

Tabela 32- Parâmetros utilizados na análise hipsométrica da bacia hidrográfica do rio de Mougás.

Será de observar que as altitudes mais elevadas do curso de água principal se verificam nos MDE derivados do ALS, destacando-se dos restantes o modelo de 2 metros de resolução, ideia que nos indica que o maior comprimento do rio principal, já observado, se prende com o facto de este se iniciar a maior altitude e não por apresentar uma maior sinuosidade.

Ao nível dos declives, a tendência é a já expressa para a totalidade da área, denotando-se os valores mais elevados dos MDE derivados do ALS face aos restantes uma tendência para uma maior apropriação das diferenças altimétricas em áreas reduzidas, o que proporciona uma necessária maior apropriação dos declives.

As diferenças nas extensões do curso de água principal e altitude máxima, levam a que se verifiquem algumas diferenças no declive médio do curso de água principal, apresentando, novamente, os MDE derivados de ALS os valores menores e o MDE BTN 10x10 os valores mais elevados.

A análise dos perfis longitudinais elaborados a partir dos diferentes MDE assume-se de difícil interpretação, isto porque as diferenças verificadas ao nível do traçado e comprimento influenciam a representação do perfil (Figura 61). No entanto, uma observação pormenorizada dos perfis, parece apontar para uma melhor apreensão da morfologia por parte dos MDE derivados do ALS, não se verificando variações tão abruptas na captação da morfologia que tornam difícil a sua compreensão. Note-se, por exemplo, os cerca de 2500 metros terminais do curso de água, onde a linha do perfil toma um contorno mais suave, típico de uma área com menores declives, e cuja justificação para as diferenças não se fica apenas pelo efeito de resolução, uma vez que se verificam diferenças sensíveis entre o MDE ALS 5x5 e os outros dois com a mesma resolução, que expõem uma representação do perfil em “escadaria”.

Este aspeto apresenta algum impacto no estudo da rede hidrográfica, por exemplo, na identificação de *Knickpoints*²⁹, pois ao estarem relacionados com as alterações na litologia e/ou tectónica, são identificados pela mudança brusca de declive ao longo do curso do rio (Goudie, 2004; Phillips e Lutz, 2008; Phillips *et al.*, 2010; Gonga-Saholiariliva *et al.*, 2011), pelo que o referido efeito limita a sua identificação gráfica.

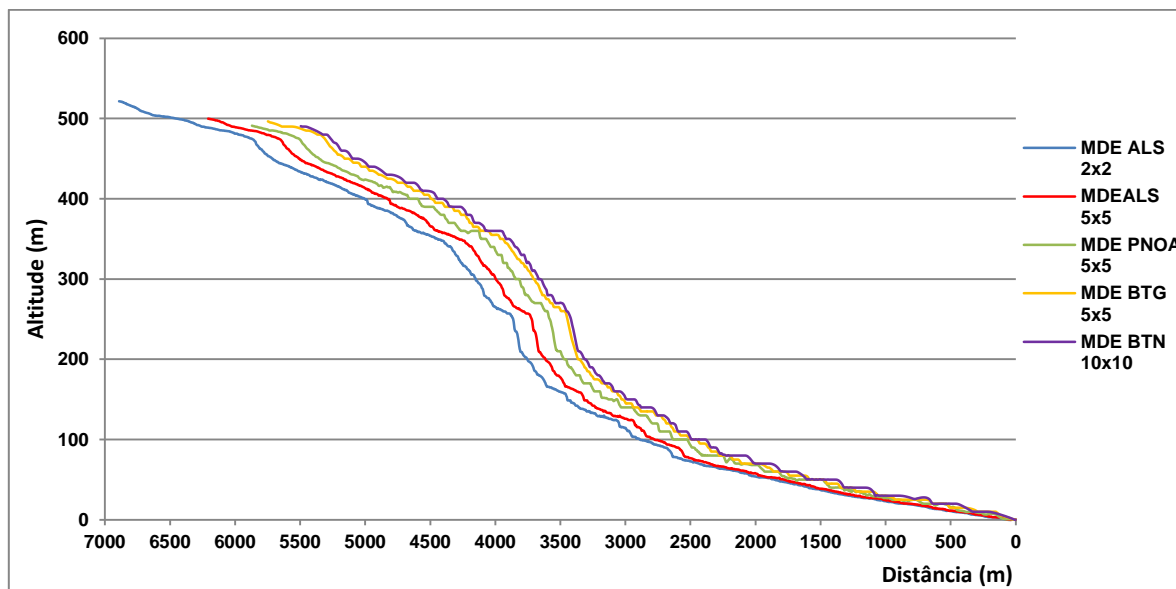


Figura 61- Perfis longitudinais do rio de Mougás obtidos a partir dos diferentes MDE

A figura 62, porém, permite ilustrar duas das muitas situações em que se verificam as diferenças de traçado. Torna-se visível que as redes geradas não só apresentam diferenças significativas de traçado no que concerne ao percurso, como também no que diz respeito à sua extensão. Verifica-se, ainda, que as redes hidrográficas geradas a partir dos MDE derivados dos dados ALS apresentam uma maior adequação quando comparados com o terreno através do ortofotomapa, que as redes derivadas dos outros modelos apresentam partes do traçado representadas de forma muito retilínea, denotando a fraca capacidade de apreensão do percurso do curso de água e que especialmente a rede hidrográfica derivada do MDE ALS 2x2 apresenta uma maior extensão, tendencialmente capaz de se apropriar melhor dos percursos dos cursos de água de pequeno caudal, visível no caso ilustrado, uma vez que o seu percurso se prolongou até ao que se afigura como a nascente daquele curso de água.

²⁹ O termo *KnickPoint* refere-se a situações em que se verificam anormais ruturas de declive no perfil longitudinal de um curso de água. (Goudie, 2004)

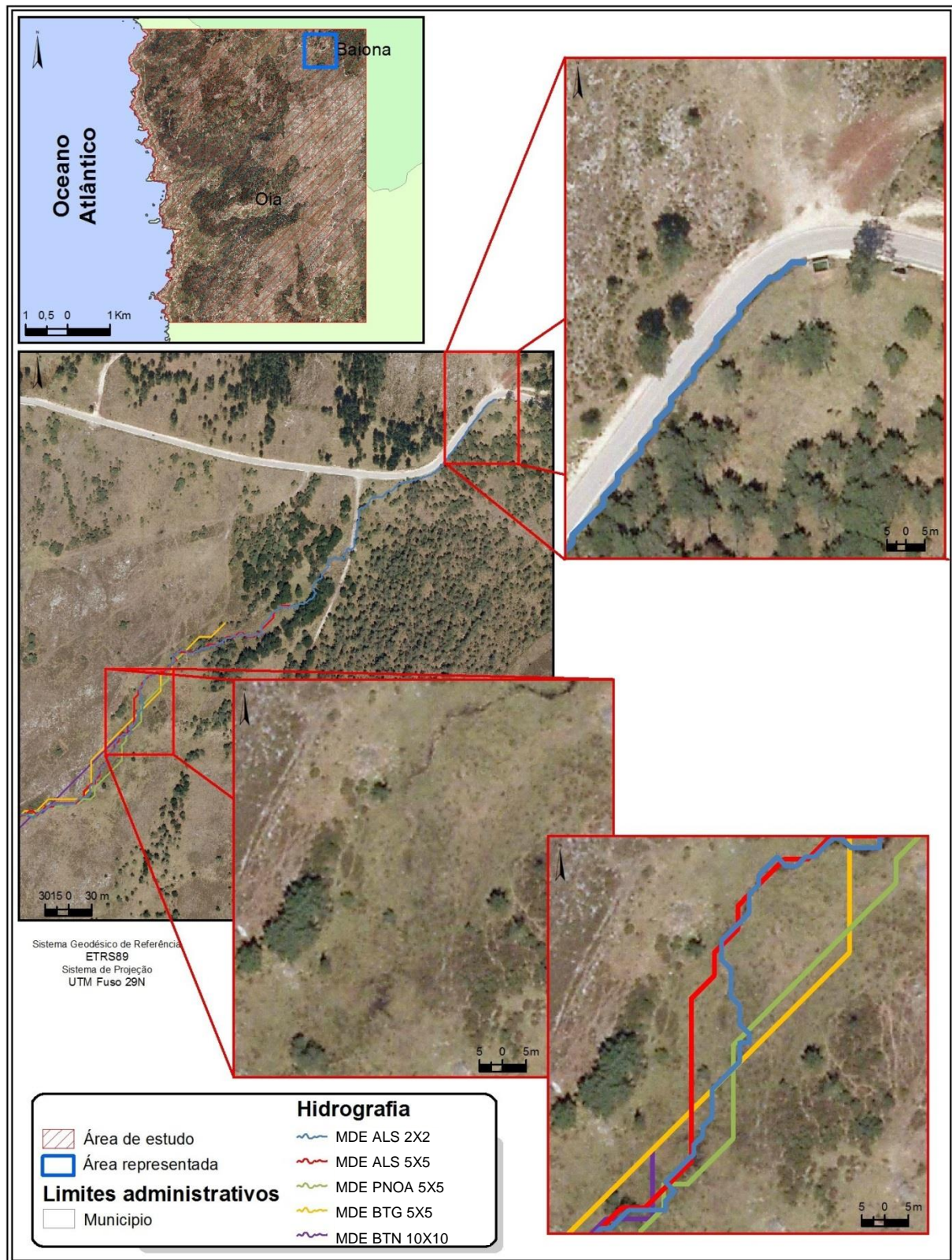


Figura 62- Pormenores do traçado do rio de Mougás junto à nascente

É possível identificar também diferenças significativas no setor anteriormente identificado como A (Figura 63). Na realidade, os traçados automáticos da rede hidrográfica são bastante diferentes, o que não invalida que, por vezes, apresentem proximidade.

As principais diferenças verificam-se nas áreas com mais vegetação, relacionando-se, como já referido anteriormente, com a melhor capacidade de aferição das pequenas diferenças na topografia por parte do MDE ALS 5x5.

Facto também marcante é a representação dos cursos de água junto à estrada, onde o escoamento natural se encontra alterado, aspeto que só é apreendido pelos MDE ALS 5x5 e MDE PNOA 5x5, apresentando o segundo algumas diferenças em relação ao MDE ALS 5x5 e incorreções em relação à realidade.

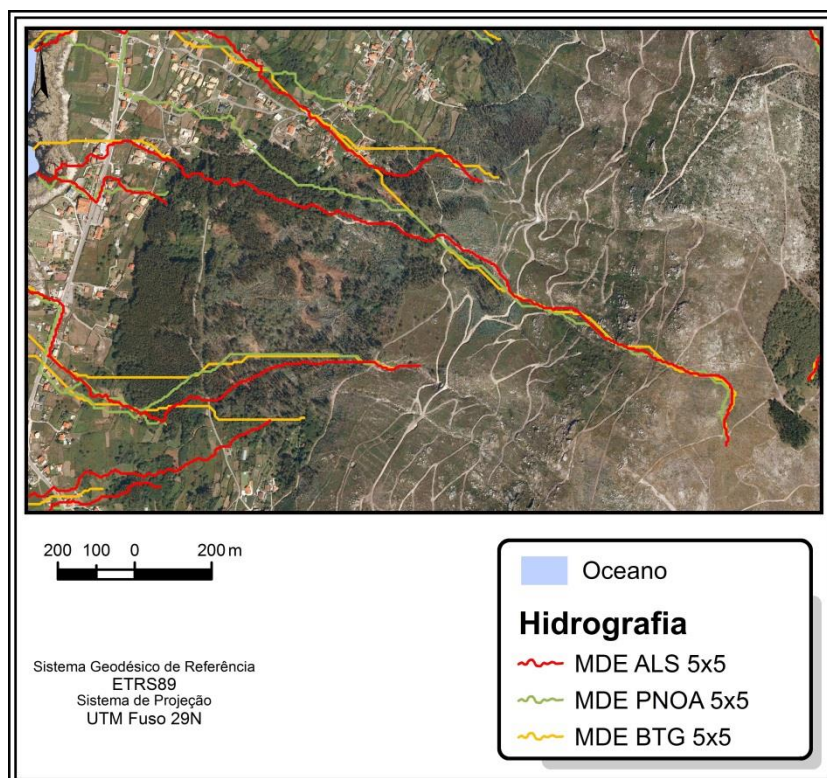


Figura 63- Traçado da rede hidrográfica a partir dos MDE com a resolução de 5 metros para o setor A.

Dada a constatação destas diferenças no traçado dos cursos de água, revelou-se oportuno aferir as diferenças verificadas entre o traçado dos cursos de água gerados automaticamente a partir dos diferentes MDE e os traçados representados na cartografia BTG 1:5000 e BTN 1:25000, que se presume terem sido elaboradas através de interpretação visual, ou pelo menos sofrido processo de correção após geração por processos automáticos, o que conduzirá, em ambos os casos, a um maior rigor de representação.

Assim, pela análise da tabela 33, é possível verificar que nas diferentes distâncias de afastamento, consideradas em relação ao curso de água de referência, os cursos de água principais gerados a partir dos dados do ALS apresentam sempre uma maior proximidade. Os valores apresentados pelo curso de água gerado a partir do MDE ALS 5x5 revela, na nossa

opinião, valores extraordinários de adequação, que ultrapassam os 75% no caso dos 5 metros de afastamento e 90% no caso dos 10 metros de afastamento.

			Cartografia de referência						Comprimento total do curso de água (Km)
			BTG 1:5000			BTN 1:25000			
Distância de afastamento (m)			2,5	5	10	2,5	5	10	
MDE de comparação	MDE ALS 2x2	Comprimento (Km)	3,52	5,26	6,31	3,30	5,34	6,26	6,89
		% em relação ao total	51,11	76,27	91,53	47,95	77,50	90,78	
	MDE ALS 5x5	Comprimento (Km)	3,37	5,05	6,07	3,15	4,99	6,02	6,21
		% em relação ao total	54,22	81,29	97,79	50,67	80,37	97,00	
	MDE PNOA 5x5	Comprimento (Km)	1,39	2,69	4,27	1,66	2,78	4,27	5,87
		% em relação ao total	23,60	45,86	72,80	28,28	47,27	72,77	
	MDE BTG 5x5	Comprimento (Km)	1,88	3,35	4,76	1,62	3,09	4,77	5,71
		% em relação ao total	32,85	58,61	83,32	28,37	54,12	83,48	
	MDE BTN 10x10	Comprimento (Km)	1,46	2,77	4,10	1,68	2,76	4,18	5,48
		% em relação ao total	26,60	50,53	74,69	30,58	50,24	76,18	

Tabela 33- Comparação dos traçados das redes hidrográficas geradas automaticamente a partir dos MDE e as redes hidrográficas representadas na cartografia oficial à escala 1:5000 e 1:25000

Dadas as diferenças referidas e as dificuldades de comparação entre os perfis longitudinais e os traçados obtidos automaticamente, optou-se por avaliar o impacto dos diferentes MDE na geração de perfis longitudinais com o mesmo traçado, tendo-se, para tal, selecionado o curso de água principal representado na BTN à escala 1:25000 e utilizado apenas os MDE originados com a resolução de 5 metros, aqueles que apresentam mais facilidade de comparação, dada a igual resolução (Figuras 64 e 65).

Pela análise destas figuras continuam a verificar-se as tendências enunciadas anteriormente, nomeadamente a relacionada com a melhor captação aparente da morfologia por parte do MDE ALS 5x5.

Verifica-se também que, em especial, nos 3000 metros terminais do curso de água, o MDE ALS 5x5 corre a uma cota significativamente mais baixa que os restantes e de forma mais suave, podendo isto significar que este se encontra traçado de forma mais aproximada com o verdadeiro leito do rio, uma vez que terá menor tendência para apresentar variações bruscas no declive.

Aparentemente, também se verificam maiores diferenças nos traçados nas áreas onde o rio apresenta não só maiores declives, como também maiores mudanças de declives, indiciando-se, novamente, uma maior apropriação das características da morfologia por parte do MDE ALS 5x5.

Ao nível das diferenças verificadas face ao MDE de referência (MDE ALS 5x5) saliente-se ainda, que os dois modelos comparados não variam sempre com a mesma tendência e

magnitude, dando a entender que os três modelos apresentam representações do terreno com, diferenças significativas.

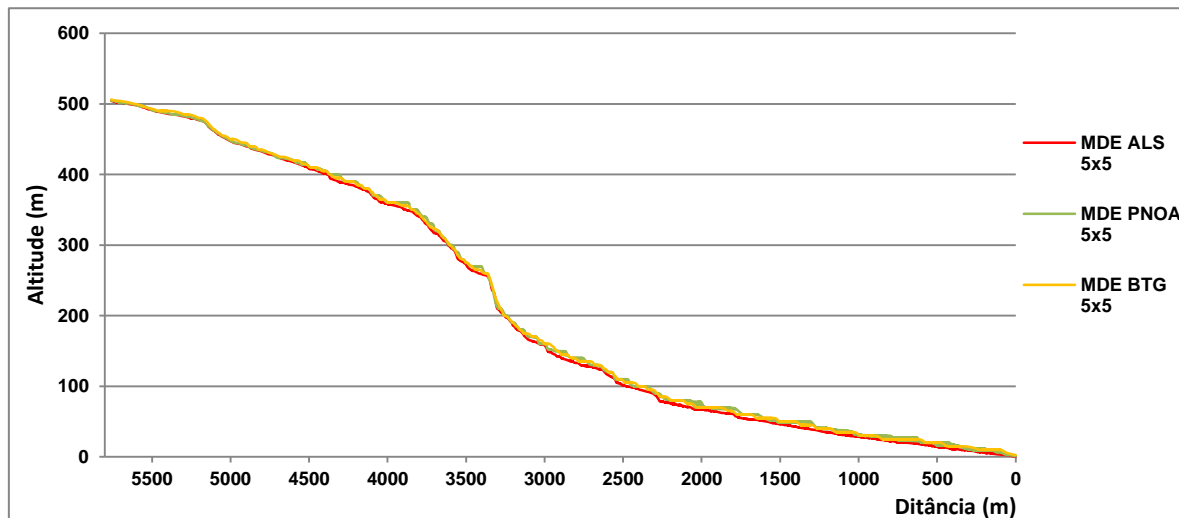


Figura 64- Perfis longitudinais do rio de Mougás, obtidos a partir dos MDE com a resolução de 5 metros e tendo com referência de traçado, a rede hidrográfica na BTN à escala 1:25000

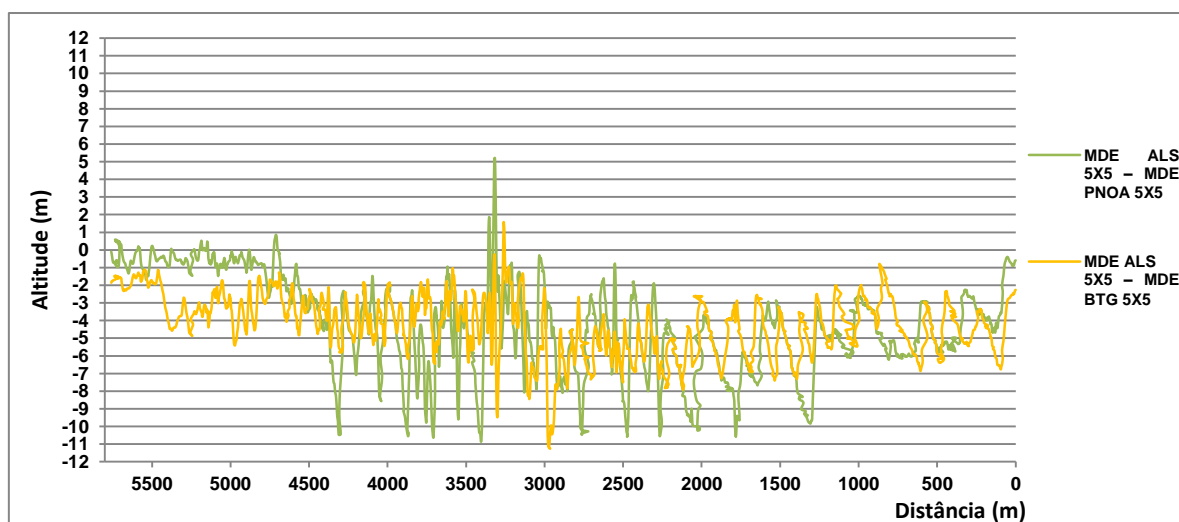


Figura 65- Diferenças de altitude dos perfis longitudinais do rio de Mougás, obtidos a partir dos MDE com a resolução de 5 metros e tendo com referência de traçado, a rede hidrográfica na BTN à escala 1:25000

Se se verificam diferenças de traçado e diferenças de altitude ao longo do curso de água, será suposto que estas diferenças se reflitam de forma bastante acentuada de forma perpendicular ao longo do seu percurso longitudinal.

Esta aceção pode ser conferida através dos perfis representados na figura 66. Torna-se evidente que se verificam significativas diferenças altimétricas ao longo de todo o curso do rio, mas, além destas diferenças, verificam-se, simultaneamente e em sua consequência, diferenças significativas na captação das formas. Este último aspeto torna-se particularmente evidente nos perfis 5 e 7, que correspondem, respetivamente, às partes mais a montante e mais a jusante do

curso de água, em que o relevo da área é pautado por menores declives e as diferenças altimétricas são menos significativas. Nestes, os dois modelos derivados do ALS, em particular o modelo de 2 metros de resolução, conseguem apreender muito melhor o talvegue/leito e margens do rio, facto que os restantes, em especial, os MDE BTG 5x5 e MDE BTN 10x10, não representam ou quase não permitem a sua identificação.

No curso intermédio, representado pelo perfil 6 (Figura 66), verifica-se que embora subsistam diferenças altimétricas consideráveis, não são evidentes diferenças tão grandes na captação das formas do relevo, já que os dados obtidos a partir dos diferentes modelos apresentam maiores semelhanças.

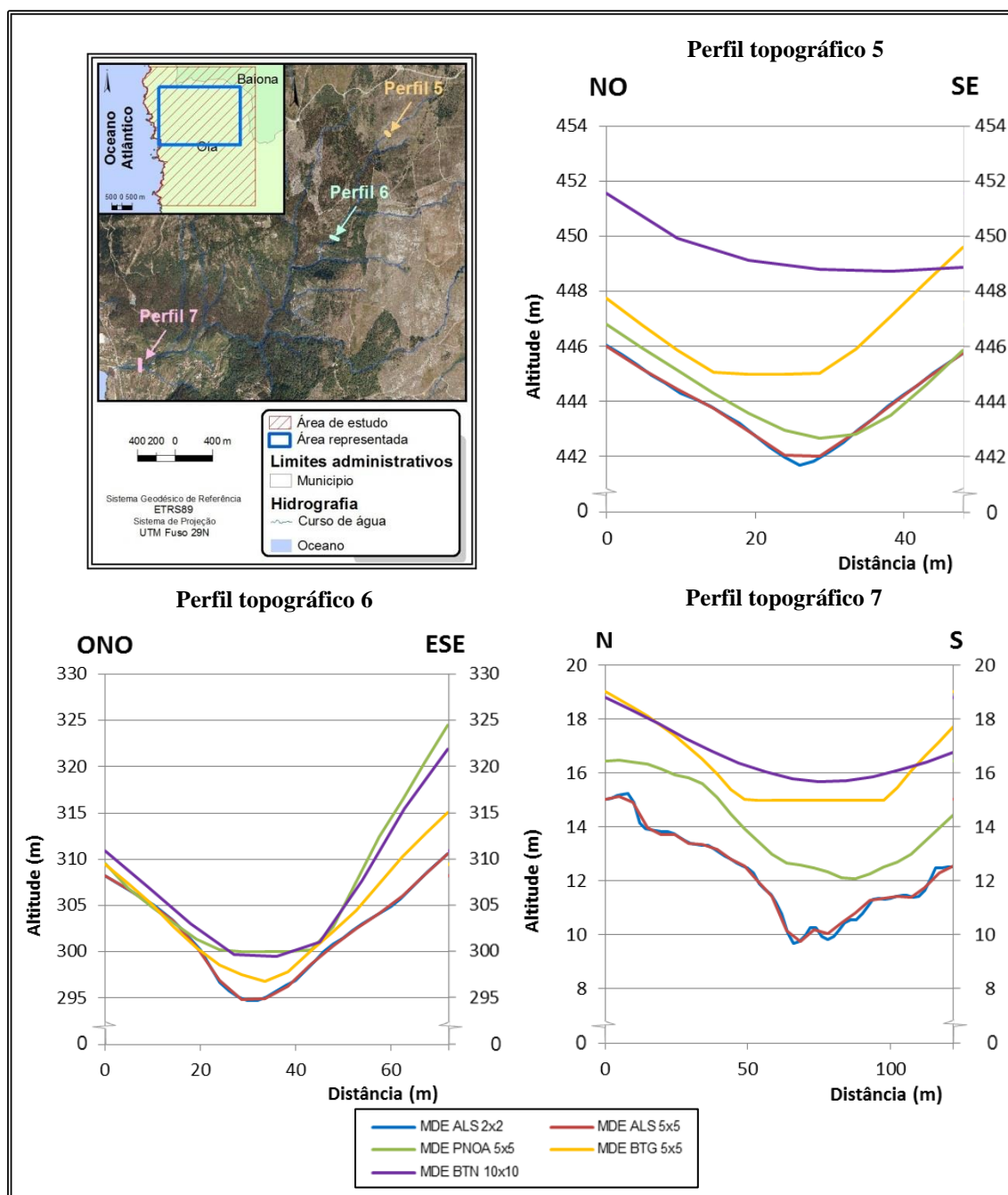


Figura 66- Perfis topográficos 5, 6 e 7 medidos ao longo do rio de Mougás

Na sequência de algumas ideias já apresentadas, os vários modelos, pela análise comparativa da sua curva hipsométrica (Figuras 67 e 68), apresentam algumas diferenças sensíveis, especialmente nas áreas de altitude mais baixas, inferiores aos 375 metros, que correspondem a cerca de 40% da área.

As diferenças verificadas em relação ao MDE de referência apresentam também comportamentos diversificados. Enquanto o MDE PNOA 5x5 apresenta sempre valores mais baixos que o de referência, os MDE BTG 5x5 e BTN 10x10 apresentam sempre valores mais elevados. Já o MDE ALS 2x2 apresenta valores mais elevados nas altitudes mais elevadas e valores menos elevados nas altitudes mais reduzidas, podendo uma justificação estar relacionada com o seu maior rigor na identificação das diferenças altimétricas.

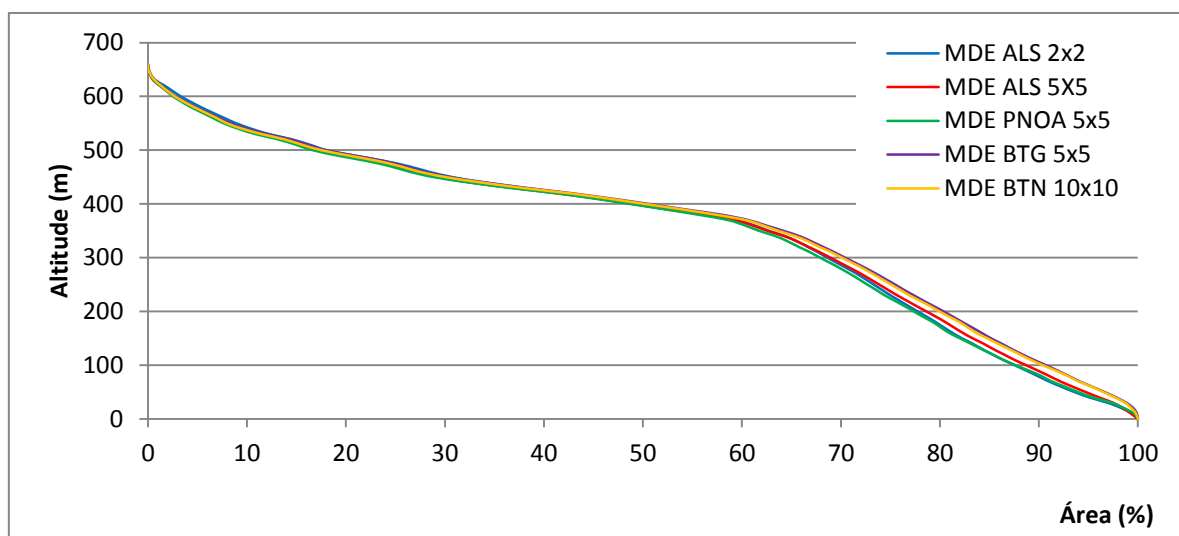


Figura 67- Curva hipsométrica do rio de Mougás para os diferentes MDE gerados

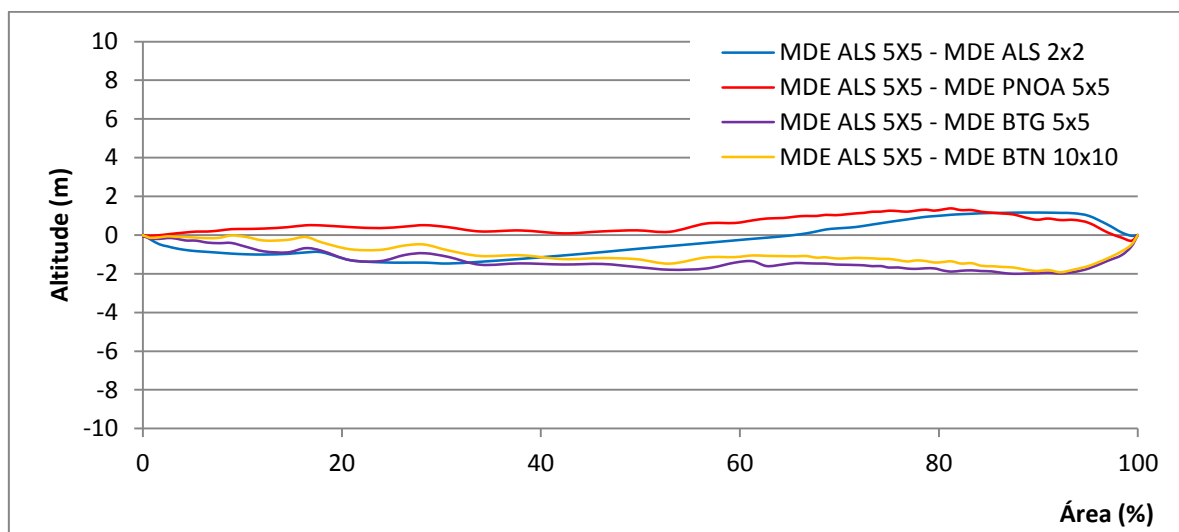


Figura 68- Diferenças entre as curvas hipsométricas do MDE de referência (MDE ALS 5x5) e os restantes

No que concerne ao EMQ (Tabela 34), calculado para as diferenças registadas na curva hipsométrica entre o MDE de referência e os restantes, verifica-se que os menores desvios são

apresentados pelo MDE PNOA 5x5, seguido do MDE ALS 2x2, enquanto os restantes apresentam valores um pouco mais distantes.

	MDE ALS 2x2	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
EMQ	0,73	0,63	1,97	1,23

Tabela 34- EMQ entre as curvas hipsométricas dos MDE e a curva hipsométrica do MDE de referência

No que diz respeito às características da rede hidrográfica, verifica-se, assim, pela análise da tabela 35, uma diferença clara, crescente ou decrescente, de valores, consoante a rede hidrográfica tenha sido gerada através dos MDE de 2, 5 ou 10 metros de resolução. Os valores mais elevados, no que respeita aos comprimentos da rede hidrográfica, número de segmentos e sinuosidade, são referentes ao MDE ALS 2x2 e os menores referentes ao MDE BTN 10x10, o que nos leva a considerar, novamente, a maior capacidade de apreensão da morfologia e, como tal, da geração da rede hidrográfica mais completa, por parte dos MDE de maior resolução.

Analisando os valores referentes apenas aos MDE com resolução de 5 metros, as tendências são semelhantes, verificando-se a mesma lógica de variação dos valores entre os MDE ALS 5x5, MDE PNOA 5x5 e MDE BTG 5x5, apresentando o primeiro os valores mais elevados. Esta tendência de valores leva-nos a presumir uma maior capacidade dos modelos derivados do ALS de melhor apreenderem a realidade no que concerne à geração da rede hidrográfica.

ANÁLISE LINEAR	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
Comprimento total dos cursos de água (Km)	29,83	28,35	27,87	26,27	24,71
Comprimento do curso de água principal (Km)	6,89	6,21	5,87	5,71	5,48
Extensão média do percurso superficial (Km)	1,196	1,187	1,144	1,121	1,059
Gradiente do curso de água principal (m)	75,64	80,49	83,67	86,91	89,44
Número de segmentos	55	51	51	47	47
Segmento de maior comprimento (Km)	3,65	4,30	4,35	4,03	3,91
Segmento de menor comprimento (Km)	0,01	0,04	0,04	0,01	0,05
Comprimento do maior percurso de escoamento (Km)	7,95	7,32	7,22	6,86	6,68
Comprimento da principal linha de escoamento (Km)	6,89	6,92	6,81	6,61	5,98
Sinuosidade	1,342	1,244	1,177	1,149	1,103

Tabela 35- Parâmetros utilizados na análise linear das redes hidrográficas do rio de Mougás

De realçar que as diferenças verificadas poderão apresentar impacto significativo na análise da dinâmica fluvial, pois extensões maiores da rede hidrográfica, associadas às mesmas diferenças altimétricas, resultam em gradientes menores, indicando uma maior propensão para menores velocidades de escoamento, capacidade de transporte e erosão. Por outro lado, o maior número de segmentos poderá ser associado a uma maior capacidade de captação de água do

curso principal e como tal um maior caudal, muito embora estas conclusões possam apenas ser retiradas de uma forma generalista e teórica.

No que diz respeito à hierarquização da rede hidrográfica, segundo os critérios definidos por *Strahler* (Strahler, 1957), as pequenas dimensões da rede e bacia hidrográfica fazem com que as diferenças sejam pouco relevantes. No entanto, pela análise da tabela 36, será possível de referir que as tendências anteriormente mencionadas se manifestam, especialmente no que respeita ao número de segmentos de primeira ordem registados pelos MDE derivados do ALS e do MDE PNOA 5x5.

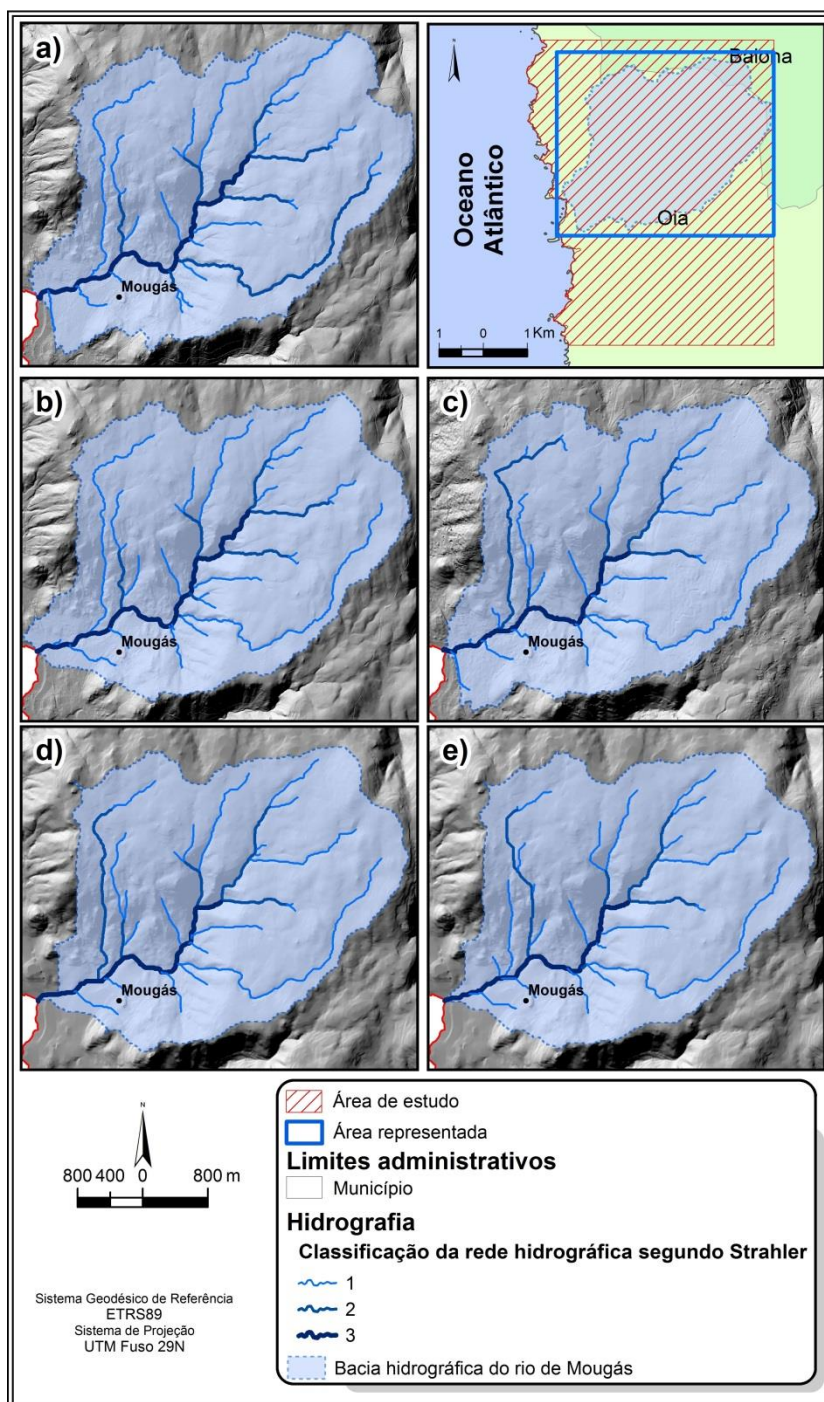
MDE	Ordem	Segmentos		Comprimento total dos segmentos		Comprimento médio dos segmentos (Km)	Relação de bifurcação	
		N.º	%	Km	%		1ª /2ª ordem	2ª /3ª ordem
MDE ALS 2x2	1	28	50,91	16,32	54,71	0,58	2,00	0,87
	2	13	23,64	9,01	30,20	0,69		
	3	14	25,45	4,50	15,09	0,32		
MDE ALS 5x5	1	26	50,98	19,35	68,27	0,74	2,17	0,73
	2	11	21,57	4,65	16,41	0,42		
	3	14	27,45	4,34	15,32	0,31		
MDE PNOA 5x5	1	26	50,98	17,80	63,86	0,68	2,00	0,86
	2	12	23,53	6,63	23,79	0,55		
	3	13	25,49	3,44	12,35	0,26		
MDE BTG 5x5	1	24	51,06	16,63	63,33	0,69	1,85	1,00
	2	12	25,53	6,32	24,06	0,53		
	3	11	23,40	3,31	12,62	0,30		
MDE BTN 10x10	1	24	51,06	16,45	66,56	0,69	2,18	0,71
	2	10	21,28	4,99	20,18	0,50		
	3	13	27,66	3,28	13,26	0,25		

Tabela 36- Classificação da rede hidrográfica do rio de Mougás por ordem, segundo a classificação de *Strahler*, e relação de bifurcação.

Registe-se, ainda, que tendo em consideração o referido, os valores apresentados pela relação de bifurcação, inferiores a 3, denotam, segundo *Strahler* (1957), um possível condicionalismo que poderão ser de ordem litológica ou tectónica, isto porque segundo o mesmo autor os valores médios deste parâmetro se situam entre 3 e 5.

No que diz respeito à análise da forma da bacia hidrográfica (análise areal), dos diferentes impactos em relação ao escoamento e da sua propensão maior ou menor para cheias, os valores apresentados pelos parâmetros iniciais utilizados no cálculo dos índices não apresentam grandes discrepâncias entre si.

Contudo, se considerarmos a pequena dimensão da área, verifica-se que as diferenças entre os dados derivados do MDE ALS 2x2 e os restantes podem originar valores com alguma discrepância no que se relaciona aos índices derivados, principalmente se estes índices incorporarem, simultaneamente, dados relacionados com a rede hidrográfica, que também já apresentavam alguma diferença de valores.



entre a largura e comprimento e índice de alongamento, verifica-se que, apesar de alguma circularidade, a bacia hidrográfica ainda se afasta bastante desta.

	MDE ALS 2x2	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	MDE BTN 10x10
Área da bacia (km ²)	12,47	11,94	12,18	11,72	11,67
Perímetro da bacia (Km)	22,79	20,41	21,33	19,08	18,18
Comprimento da bacia (Km)	5,13	4,99	4,99	4,97	4,97
Largura da bacia	3,71	3,64	3,60	3,64	3,61
Área drenada pelo segmento maior (Km ²)	1,48	1,64	1,68	1,67	1,66
Relação entre o comprimento e área da bacia	1,45	1,44	1,43	1,45	1,46
Coefficiente de compacidade ou Índice de Gravelius	1,82	1,67	1,72	1,57	1,50
Índice de circularidade	0,30	0,36	0,34	0,40	0,44
Relação entre a largura e comprimento da bacia	0,72	0,73	0,72	0,73	0,73
Índice de alongamento	0,78	0,78	0,79	0,78	0,78
Fator de Forma	0,26	0,31	0,35	0,36	0,39
Densidade de drenagem (Km/Km ²)	2,392	2,374	2,288	2,241	2,118
Densidade de segmentos da bacia (nº de rios/ Km ²)	4,409	4,270	4,188	4,011	4,028
Densidade hidrográfica (rios 1ª ordem/Km ²)	2,245	2,177	2,135	2,048	2,057
Coefficiente de manutenção (m ² /m).	418,140	421,284	437,033	446,144	472,207
Coefficiente de torrencialidade	5,368	5,168	4,885	4,591	4,356

Tabela 37- Parâmetros utilizados na análise areal da bacia hidrográfica do rio de Mougás

Também o índice de circularidade, que afere a mesma característica, variando entre 0 e 1 e em que 1 representa a circularidade, apresenta a mesma tendência, ou seja, um maior afastamento da circularidade por parte do MDE ALS 2x2 e, também, dos MDE ALS 5x5 e MDE PNOA 5x5.

Apesar de o MDE ALS 2x2 possuir uma área maior, o facto de possuir também um comprimento total da rede hidrográfica significativamente maior faz com que a densidade de drenagem, a densidade de segmentos da bacia e a densidade hidrográfica sejam, também, mais elevadas. As diferenças do comprimento total da rede hidrográfica, geradas pelos diferentes MDE, fazem-se sentir nos restantes valores, sendo estes, regra geral, tão mais baixos quanto são os comprimentos totais da rede hidrográfica. Esta característica leva-nos a questionar as diferenças verificadas ao nível da diferença da área, concluindo-se que, embora se verifiquem diferenças, estas não são tão significativas como as verificadas em relação ao comprimento da rede hidrográfica, inferindo-se daqui que os diferentes MDE não apresentam diferenças sensíveis ao nível da delimitação das bacias ou seja das grandes tendências do relevo que definem os interflúvios, mas poderão, isso sim, apresentar diferenças ao nível da representação dos pormenores do relevo que proporcionam a definição de pequenos cursos de água.

O coeficiente de torrencialidade, um indicador importante na perceção da capacidade de resposta da bacia hidrográfica a um evento pluviométrico e no estudo das cheias rápidas,

apresenta os valores a variar no sentido inverso dos referidos anteriormente, ou seja, o MDE ALS 2x2 apresenta o valor mais elevado, valor que diminui nos diferentes MDE de 5 metros e apresenta os números mais baixos no MDE BTN 10x10. Sendo assim, a probabilidade para as cheias rápidas é maior se acordo com o primeiro e menor segundo o último referido, o que se coaduna com as características encontradas ao nível dos sedimentos nos leitos e margens dos rios, como ilustrado anteriormente na fotografia da figura 57.

4.4.3. Modelação hidráulica – definição de perímetros de cheia

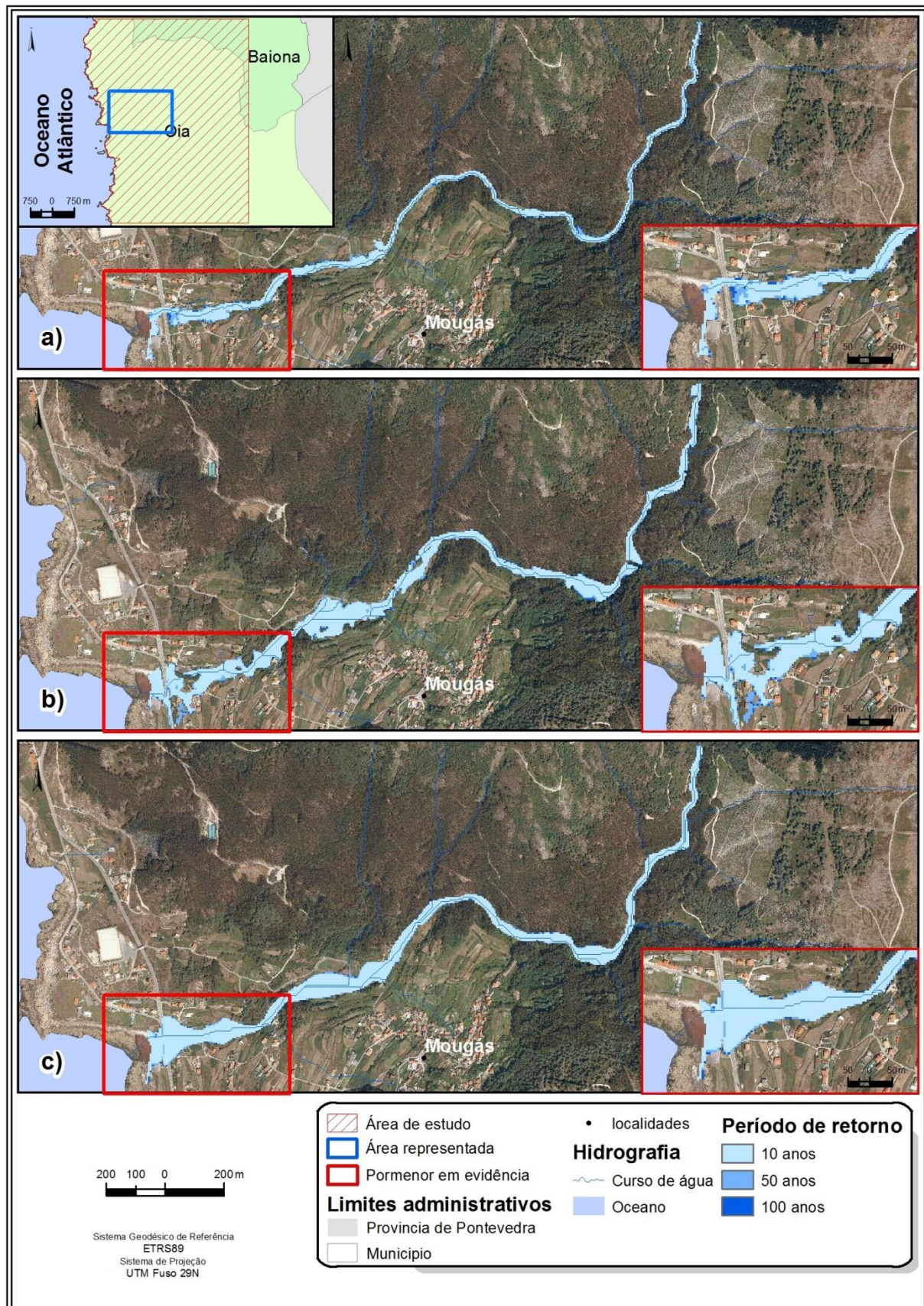
De forma a verificar do impacto dos diversos MDE e redes hidrográficas geradas a partir dos mesmos numa situação particular, foram efetuadas modelações hidráulicas, procurando aferir das diferentes delimitações dos perímetros de cheia, para cerca de 2800 metros da parte terminal do curso principal do rio de Mougás.

Dadas as características encontradas no decorrer do trabalho no campo, não se esperava a geração de perímetros de inundação de grande dimensão, já que o curso de água/bacia hidrográfica são de pequena dimensão e o rio apresenta um vale relativamente profundo e largo. Contudo, dada a abundância e as grandes dimensões dos blocos que se encontram ao longo do rio, ilustrado em fotografias anteriores, foi também possível aferir que este deve ser marcado por episódios de forte torrencialidade.

Será de realçar que o objetivo desta parte do trabalho não é a delimitação de perímetros de inundação rigorosos, mas sim a comparação dos resultados e a aferição do impacto dos dados gerados pelos diferentes modelos. Desta forma, nas modelações, não foram introduzidos aspetos importantes, como infraestruturas humanas, por se tornarem irrelevantes já que o impacto seria o mesmo, e os parâmetros utilizados foram controlados de maneira a que as diferenças existentes resultassem apenas dos dados fornecidos pelos MDE.

Foram modelados perímetros para os três modelos de 5 metros de resolução, pelos motivos já apontados em relação à análise efetuada para o setor A e para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Pela análise da figura 70 e tabela 38, onde se encontram representados os perímetros calculados para os três modelos com resolução de 5 metros, constata-se que, aparentemente, não existem grandes diferenças entre os perímetros gerados para os três períodos de retorno com base no mesmo MDE. As diferenças são pequenas e distribuídas ao longo do curso de água, tornando-se mesmo quase impercetíveis. Embora a área ocupada aumente gradualmente do menor para o maior período, como seria de esperar, as diferenças não se assumem como muito significativas, facto que se relaciona com as características da morfologia onde a água corre, propícia à circulação a grandes velocidades, permitindo um aprofundamento e alargamento do leito em episódios de cheia.



Período de retorno	MDE ALS 5x5	MDE PNOA 5x5	MDE BTG 5x5	Acréscimo entre MDE ALS 5x5 para o MDE PNOA 5x5 (%)	Acréscimo entre MDE ALS 5x5 para o MDE BTG 5x5 (%)
10 anos	53650	99775	100175	46,2	46,4
50 anos	60200	107250	105325	43,9	42,8
100 anos	62800	111200	107650	43,5	41,7

Tabela 38- Área ocupada pela água em situações de cheias, para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, para cada um dos MDE e diferença (%) em relação ao MDE ALS 5x5

Contudo, se analisados os perímetros dos diferentes MDE para o mesmo período de retorno, verificam-se diferenças sensíveis entre o MDE ALS 5x5 e os restantes, já que estes apresentam uma área total para todos os períodos com acréscimo de valores superiores a 40% do primeiro.

Se comparados os perímetros de cheia para um mesmo período de retorno (Figura 71), as diferenças tornam-se mais evidentes e as relações numéricas enunciadas fazem mais sentido, uma vez que são notórias as diferenças existentes, quer na área, quer na forma definida pelos mesmos, denotando a influência clara de cada um dos diferentes MDE. Na análise da figura é também visível, que por vezes, o MDE PNOA 5x5 apresenta lacunas na apreensão da topografia, uma vez que uma parte do curso do rio surge, com pouca lógica, sem a definição do perímetro de cheia no próprio leito.

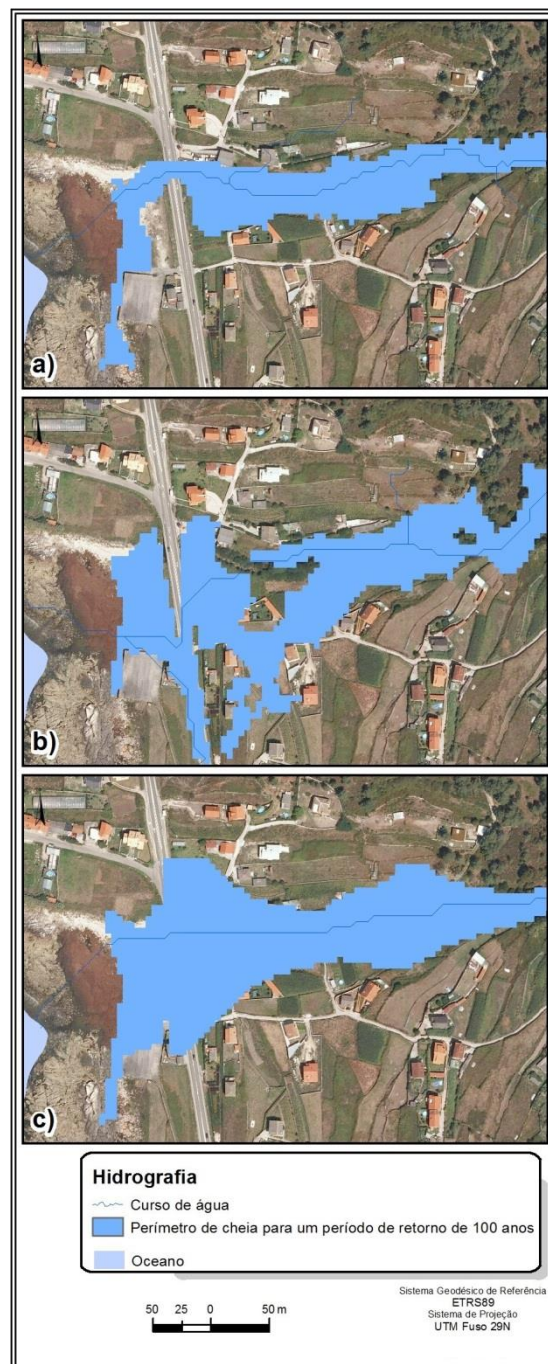


Figura 71- Perímetros de cheia para um período de retorno de 100 anos, definidos para o rio de Mougás a partir dos diferentes MDE com a resolução de 5 metros.

a) Obtido a partir do MDE ALS 5x5; b) Obtido a partir do MDE PNOA 5x5; c) Obtido a partir do MDE BTG 5x5

As diferenças encontradas prendem-se claramente com a melhor apropriação da topografia do leito do rio e das áreas envolventes do vale, por parte do MDE ALS 5x5, facto já demonstrado anteriormente, e que é possível de observar na figura 72.

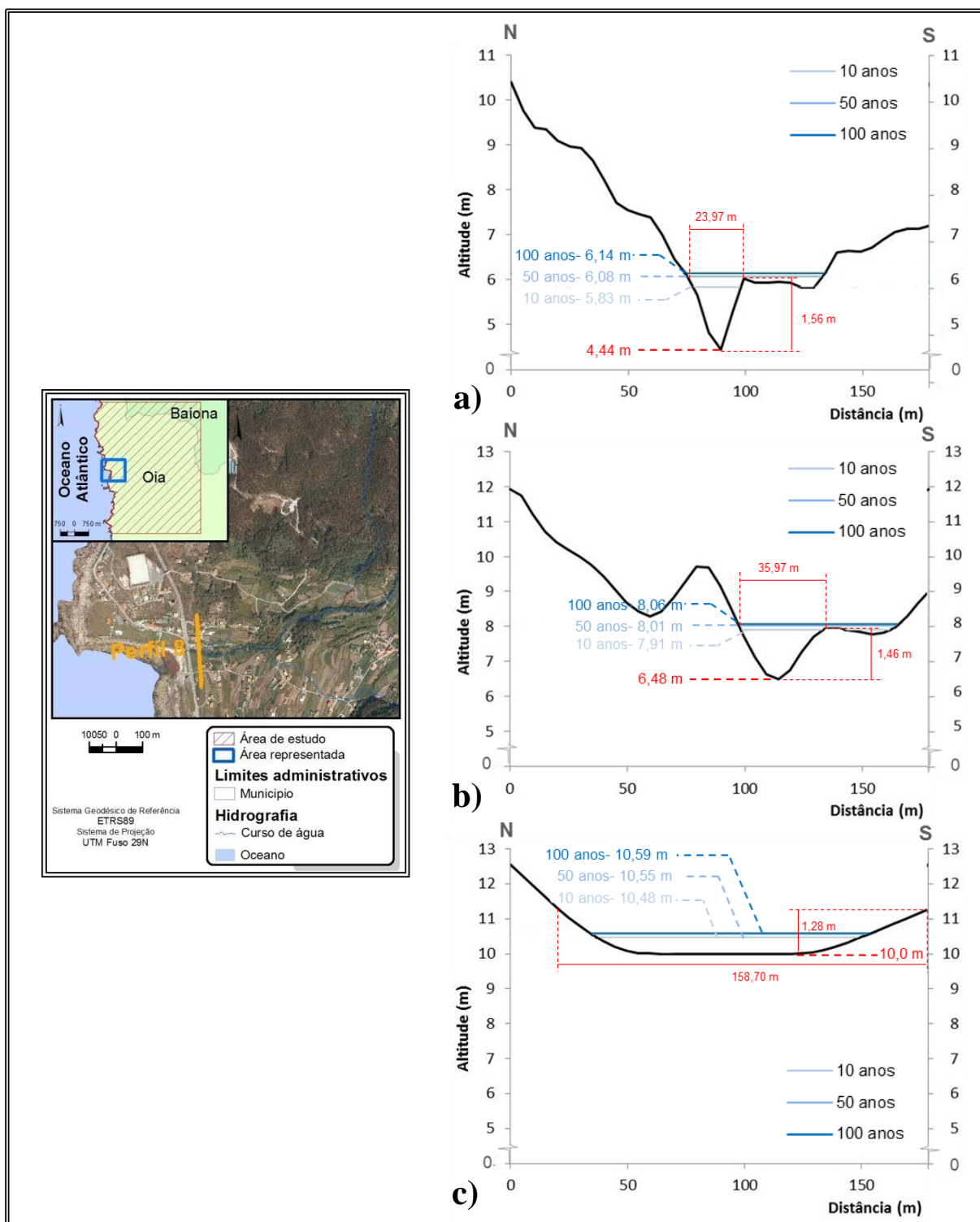


Figura 72- Perfis topográficos junto à foz do rio de Mougás e altitude da água para situações de cheia com períodos de retornos de 10, 50 e 100 anos

a) Obtido a partir do MDE ALS 5x5; b) Obtido a partir do MDE PNOA 5x5; c) Obtido a partir do MDE BTG 5x5

De facto, o MDE ALS define melhor a forma do vale, o que se torna especialmente evidente na forma como capta a seu talvegue, que surge com maior profundidade. Por outro lado, as margens dos rios também denotam uma melhor representação da variação da altitude apresentando diferenças sensíveis. Estes dois aspetos contribuem para o facto de o rio

representado pelo MDE ALS 5x5 conseguir transportar, em grande parte do seu curso, maiores caudais, com menor necessidade de ocupar as áreas envolventes, pelo que a área ocupada numa situação de cheia será menor.

As características do leito apresentadas pelo MDE BTG 5x5, por outro lado, afastam-se bastante da realidade, conseguindo definir as margens, aproximando-se a sua representação à de uma larga depressão, onde o rio apresenta maior facilidade de ocupar os espaços adjacentes em caso de maior volume do caudal.

Note-se, ainda, nos perfis a) e b) da figura 72, o que parece ser a constatação de ocorrências de episódios de cheias, uma vez que na margem direita do rio é possível de encontrar o que parece ser um canal de escoamento secundário formado pelo aumento do caudal, que deverá, simultaneamente, ter elevadas velocidades de forma a promover a escavação do canal junto à margem.

Os aspetos anteriormente referidos, num curso de água com estas características, não representam visualmente um impacto muito significativo, contudo, tais dados levam-nos a refletir sobre o impacto em rios com outros caudais e que corram em áreas com diferentes morfologias, mais propícias à existência de situações de cheias nas margens e simultaneamente muito ocupadas pelo Homem. Assim, parece-nos naturalmente que os dados do ALS podem dar um contributo muito significativo na delimitação destes perímetros de cheia, permitindo precisar com muito mais rigor a sua delimitação, constituindo-se como dados importantes neste tipo de trabalhos, que se afiguram de uma grande importância no âmbito do planeamento e ordenamento do território, nomeadamente no que concerne à salvaguarda de vidas e bens.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no ensaio comparativo parecem confirmar a ideia que os dados do ALS estão, no momento atual, a provocar uma revolução na maneira de adquirirmos dados relativos à topografia da superfície terrestre.

No ensaio, constatou-se a existência de diferenças muito significativas na forma como os MDE derivados do ALS captam as características topográficas do território, quando comparados com outras fontes de dados tradicionalmente mais acessíveis e utilizadas.

Estas diferenças tornaram-se claras desde o início, uma vez que a comparação dos valores altimétricos apresentados pelos vários MDE com os dados obtidos pelo levantamento por GPS revelaram valores muito mais próximos dos MDE derivados do ALS.

As diferenças em termos de altitude, revelaram-se bastante significativas e o EMQ calculado a partir da rede ortogonal com a equidistância de 100 metros em relação ao MDE ALS 5x5, apresentou desvios expressivos em relação a todos os modelos, exceto o MDE ALS 2x2.

Por outro lado, em todos os produtos elaborados, quando comparados os dados provenientes dos MDE derivados do ALS e os restantes, mesmo que considerados apenas os modelos com a mesma resolução, se verificaram diferenças relevantes. As diferenças revelaram-se flagrantes desde o primeiro momento através da análise visual dos sombreados de relevo. Neste caso, o aspeto mais marcante prendeu-se com a forma como a morfologia se apresenta representada. Quando comparadas com a realidade, mesmo que de forma indireta através da fotografia, as representações permitiram verificar a melhor qualidade dos MDE do ALS. Isto tornou-se particularmente evidente nas diferenças apresentadas na representação dos vales, valeiros, estradas, caminhos florestais, aceiros e socalcos, em que a diferente capacidade de apropriação/representação das pequenas diferenças de altitude se revelou fundamental.

Estas diferenças evidenciaram-se, também, ao nível dos declives. Neste caso, os MDE ALS apresentam as variações dos declives de forma notável, representando, por exemplo, os declives acentuados na transição dos socalcos ou nas bermas das estradas, quando estas apresentam a escavação de um talude ao longo de uma vertente. Além disso, os restantes MDE apresentam generalizações, nalguns casos muito consideráveis, que induzem a análise da morfologia do relevo em erro. Mais uma vez, as diferenças entre os diversos modelos foram mais significativas em situações em que as variações da altitude eram mais reduzidas.

As constatações enunciadas tornaram-se, ainda, evidentes, na análise dos perfis topográficos, cujas diferenças ao nível da altitude e da forma são muito claras, especialmente em morfologias associadas à rede hidrográfica, como a definição morfológica do leito, margens e vale dos cursos de água.

Nestes diferentes tipos de produtos, salientou-se uma diferença sensível na captação da altitude e, conseqüentemente, da morfologia, em áreas cobertas por vegetação, especialmente de grande porte. Ou seja, a capacidade de penetração do ALS na vegetação originou diferenças significativas entre os MDE derivados do ALS e os restantes, dado que nos MDE ALS, a morfologia do relevo continua a apresentar formas bem definidas, enquanto nos restantes isto não acontece. Este facto salienta-se especialmente no setor denominado como A.

A influência da vegetação na aquisição das altitudes reflete-se também nos valores de altitude, uma vez que os dados registados pelos MDE derivados do ALS são mais baixos que os restantes, indicando que a obtenção dos dados por métodos fotogramétricos reflete, em diversos casos, a altitude da vegetação.

Ao nível das características ensaiadas em relação à hidrografia, também se verificaram algumas diferenças assinaláveis. As grandes tendências do relevo parecem não apresentar variações significativas entre os MDE no que concerne à hidrografia, aspeto bem visível na definição dos interflúvios que delimitam as bacias hidrográficas. Contudo, verificam-se diferenças sensíveis na representação da morfologia associada aos cursos de água, por exemplo, ao nível da representação dos perfis longitudinais, como se constatou para o rio de Mougás e, também, no que concerne à representação dos talwegues/leitos dos rios/margens/vales, em que a captação da forma por parte dos MDE ALS representa melhorias muito significativas de representação da realidade.

Estes aspetos tornaram-se novamente mais salientes em áreas de menores desníveis altimétricos, facto evidenciado na curva hipsométrica do rio de Mougás, já que cerca de 40% da área correspondente à parte terminal, a que apresenta menores desníveis, apresentam diferenças muito relevantes.

Estas diferenças na captação da morfologia refletiram-se na geração automática das redes hidrográficas a partir dos diferentes MDE. As diferenças mais marcantes verificaram-se ao nível da representação do traçado das redes hidrográficas, não necessariamente pelo comprimento e número de segmentos, onde se pensa que a reduzida dimensão da bacia hidrográfica limitou as conclusões, mas, sobretudo, na adequação da representação face à realidade, constatada pela comparação no ortofotomapa de grande pormenor (escala), e face ao traçado representado na cartografia oficial à escala 1:5000 e 1:25000. A este nível a rede hidrográfica representada pelo ALS demonstrou uma maior adequação nas duas situações. No que diz respeito à adequação da representação à realidade mostrada pelo ortofotomapa, o MDE ALS 2x2, na generalidade dos casos, apresentou uma sobreposição quase absoluta com o leito do curso de água. Quando comparados com as redes hidrográficas representadas na cartografia oficial, as redes hidrográficas derivadas dos MDE ALS também apresentam uma proximidade muito superior à dos restantes, com diferenças que ultrapassam os 20%.

A maior adequação do traçado das redes hidrográficas dos MDE ALS, confirmou, também, nas áreas onde o normal escoamento do curso de água foi interrompido por influência antrópica, como na berma das estradas. Aqui, onde os MDE ALS apresentam uma adequação ao escoamento induzido pelo condicionamento de atividades antrópicas e os restantes não.

Refira-se, finalmente, que a maior capacidade de captação das pequenas diferenças da morfologia parecem influenciar o traçado do rio junto à nascente. Neste caso, os MDE ALS apresentam maiores extensões e, aparentemente, segmentos até mais próximo das nascentes.

No que diz respeito à modelação hidráulica e aos perímetros de cheia, com origem na informação dos diferentes modelos, as diferenças anteriormente referidas deram origem a uma definição significativamente diferentes de áreas ocupadas pela água em situações de cheia.

Para os três períodos de retorno considerados (10, 50 e 100 anos), os MDE PNOA 5x5 e MDE BTG 5x5 apresentam áreas com acréscimos de área inundada em mais de 40%, relativamente aos valores representados pelo MDE ALS 5x5, o que se relaciona, claramente, com a melhor representação da morfologia do vale/margens/leito e áreas envolventes por parte deste último.

As diferenças constatadas revelaram-se, também, influenciadoras de análises com base na informação dos diferentes modelos. Tomando como exemplo alguns setores analisados, verificou-se que os dados ALS indiciam a existência de escoamentos torrenciais ao longo das vertentes de maior declive, aspeto confirmado no trabalho no campo, dados os tamanhos dos blocos localizados no leito e nas margens dos rios, enquanto que, pela análise dos dados dos outros MDE, não se verificaram indícios de tal processo geomorfológico.

A própria morfologia captada pelos MDE ALS indicia claramente a existência de leques aluviais associados às características torrenciais da escorrência, com uma extensa área de deposição dos sedimentos localizada no sopé das vertentes analisadas, enquanto os restantes pouco ou nada permitem inferir sobre esta morfologia.

Estas diferenças que se constataram permitem-nos confirmar e demonstrar um conjunto de vantagens comparativas que já anteriormente se apontaram, com base na literatura de referência.

Desde logo, o que mais se salienta é o maior e grande rigor e precisão na representação da altitude e, conseqüentemente, da morfologia da superfície terrestre, espantosamente evidenciada nos sombreados de relevo, principalmente quando comparados com os outros, assim como nos restantes produtos elaborados.

Saliente-se, em especial, a maior capacidade revelada na captação da morfologia em áreas de menores declives. Este aspeto tornou-se especialmente visível nos produtos derivados do modelo de 2 metros de resolução, o que se associa a uma outra vantagem do ALS, a

capacidade de elaborar MDE com uma maior resolução, dada a grande quantidade de dados que são recolhidos sobre a superfície terrestre.

Uma outra vantagem significativa é a possibilidade de representar corretamente e com detalhe, o impacto derivado da ação humana, evidenciada pela representação mais apropriada de socalcos, estradas ou caminhos.

Aspeto de relevar é, também, a capacidade do ALS de captar dados altimétricos em áreas de vegetação, permitindo a captação de informação onde outras técnicas falham e/ou são muito demoradas e, por isso, muito dispendiosas.

Associada a esta última vantagem, está a possibilidade de captar dados de pormenor em áreas pouco acessíveis através de métodos clássicos, como o levantamento topográfico, dada a dificuldade de acesso ou os declives acentuados ao longo das vertentes.

As desvantagens da utilização dos dados derivados do ALS ao nível do ensaio desenvolvido não se tornaram muito evidentes, o que não quer dizer que não se verifiquem. A este nível, destacam-se duas grandes limitações sentidas durante a realização do trabalho. Primeiro, os problemas de processamento causados pela enorme quantidade dos dados, que não apresentam compatibilidade com a generalidade dos *softwares* mais utilizados para processar informação geográfica. Será de considerar, também, que a área utilizada na realização do ensaio é uma área relativamente pequena e que foram utilizados *hardwares* com capacidades bastante acima da média no mercado informático atual, pelo que estes problemas se farão sentir de forma mais grave em áreas de maiores dimensões.

O segundo aspeto relaciona-se bastante com este e prende-se com a disponibilidade de *softwares* para o tratamento dos dados ALS, que são, na generalidade dos casos, proprietários, nem sempre satisfazem todas as necessidades do utilizador e apresentam custos elevados de aquisição.

Para o futuro, pensa-se que a difusão dos dados derivados do ALS e consequentes trabalhos deveriam ser estimulados, constatadas as vantagens comparativas que apresenta, ultrapassando largamente as desvantagens, mesmo considerando as desvantagens associadas ao custo de aquisição dos dados, que não foi aqui avaliada, dada a cedência gratuita da informação utilizada.

Com o rigor e a precisão que consegue obter, o ALS poderá dar um forte contributo na elaboração da cartografia tradicionalmente realizada em diversas áreas, especialmente a relacionada com os aspetos geomorfológicos, o ordenamento do território e a identificação de riscos naturais, particularmente nos casos em que as formulações apresentadas por esta cartografia dependam de dados associados à altitude.

Por outro lado, a qualidade dos resultados que o ALS permite produzir poderá dar fortes contributos no refinamento de metodologias diversificadas, uma vez que a modelação de

fenómenos, como os movimentos de vertente, a perigosidade de risco de incêndio florestal, a modelação hidráulica de perímetros de cheia, a erosão, entre outros, que dependem fortemente dos dados altimétricos de base poderá melhorar a interpretação/explicação com a inclusão destes dados no estudo, originando resultados mais aproximados à realidade.

Não será de estranhar, também, que, de futuro, sejam identificadas diferenças de tal forma sensíveis, que possam mesmo obrigar a alguns reajustamentos de parâmetros usualmente utilizados como comparativos em análises diversificadas, face à nova perspetiva fornecida pelos dados do ALS. Contudo, tal constatação só será possível de inferir após a realização de muitos mais estudos e numa fase mais desenvolvida da aplicação dos dados do ALS.

Um aspeto que se tornará muito significativo, por nós não explorado, mas que gostaríamos de explorar no futuro, será a incorporação de dados relacionados com o uso do solo, como infraestruturas humanas e vegetação, que o ALS consegue captar de forma notável, permitindo distinguir não só a sua localização, mas também as suas características em termos de altitude.

Estas premissas não poderão ser, contudo, alcançadas, se não se verificar um maior investimento na tecnologia a dois níveis. Primeiro, é necessário um maior investimento pelo lado da comunidade académica, quer ao nível da investigação, quer ao nível da divulgação, procurando o desenvolvimento de uma premissa fundamental da sua consciência social, que é a de contribuir para uma sociedade e um mundo melhor, que neste campo passa essencialmente pelos contributos que a utilização do ALS poderá dar no campo do ordenamento do território.

A comunidade científica deverá, na nossa opinião, procurar o desenvolvimento de dois vetores-chave: o desenvolvimento de aplicações para os dados e o desenvolvimento de *softwares* de processamento que permitam uma utilização mais eficaz dos mesmos.

Em segundo lugar, é fundamental uma maior consciencialização e investimento dos decisores políticos na aquisição deste tipo de dados, pois só com a sua existência é que será possível desenvolver mais estudos e contribuir para o desenvolvimento da tecnologia e dos resultados que esta permite obter.

Tal aposta acarretará, obviamente, custos, mas estes poderão ser mitigados se forem associados aos levantamentos fotogramétricos já realizados, permitindo assim dividir os custos operacionais associados às operações aéreas pelos dois produtos finais, reduzindo o investimento global.

Por fim, e embora se pense que o ensaio efetuado permita retirar ilações muito significativas, parece-nos relevante que outros estudos similares se desenvolvam em áreas de maior dimensão, utilizando os mesmos princípios de comparação e outros, de forma a ser possível confirmar, acrescentar ou até rejeitar as ilações retratadas.

6. BIBLIOGRAFIA

PUBLICAÇÕES

- ACKERMANN, F. 1999. *Airborne laser scanning - present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 64-67.
- ALVES-DA-SILVA, A. A. M. e VENTURA, J. E. E. S. 2011. *Cartografia da linha de costa: reflexões e propostas. VI Congresso de Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Ilha da Boa Vista. Cabo Verde* [Online]. Disponível em: http://www.igeo.pt/eventos/comunicacoes/Cabo_Verde/VICong_PGZCPEP_CLC_AntonioSilva.pdf. Acedido a 1 de agosto de 2012, 12 p.
- ARGALL, P. S. e SICA, R. J. 2007. Lidar (Laser Radar). *The Optics Encyclopedia*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 1305-1322.
- ASPRS. 2012. *LAS Specification version 1.4 – R12*. Disponível em: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r11.pdf. Acedido a 15 de junho de 2012, 27 p.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999a. *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 199-214.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999b. *Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 164-198.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999c. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 83-94.
- BAMBER, J. L. 2005. *Modelling Ice Sheet Dynamics with the Aid of Satellite-Derived Topography*. In: KELLY, R. E. J., DRAKE, N. A. & BARR, S. L. (eds.) *Spatial Modelling of the Terrestrial Environment*. Chichester: Wiley & Sons, pp. 13-34.
- BARUCH, A. e FILIN, S. 2011. *Detection of gullies in roughly textured terrain using airborne laser scanning data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, pp. 564-578.
- BATES, P. D., HORRITT, M. S., COBBY, D. M. e MASON, D. C. 2005. *Flood Inundation Modelling Using LiDAR and SAR Data*. In: KELLY, R. E. J., DRAKE, N. A. & BARR, S. L. (eds.) *Spatial Modelling of the Terrestrial Environment Chichester*. Wiley & Sons, pp. 79-106.
- BEGER, R., GEDRANGE, C., HECHT, R. e NEUBERT, M. 2011. Data fusion of extremely high resolution aerial imagery and LiDAR data for automated railroad centre line reconstruction. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, pp. 40-51.
- BLAIR, J. B., RABINE, D. L. e HOFTON, M. A. 1999. *The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 115-122.
- BORENGASSER, M., HUNGATE, W. S. e WATKINS, R. L. 2007. *Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications*, New York, CRC Press, 119 p.
- BOYKO, A. e FUNKHOUSER, T. 2011. *Extracting roads from dense point clouds in large scale urban environment*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, pp. 2-12.
- BRETAR, F. 2008. *Feature Extraction from LiDAR Data in Urban Areas*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 403-419.
- BRITO, M. C., GOMES, N., SANTOS, T. e TENEDÓRIO, J. A. 2012. *Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data*. *Solar Energy*, 86, pp. 283-288.
- BROCK, J. C., WRIGHT, C. W., SALLENGER, A. H., KRABILL, W. B. e SWIFT, R. N. 2002. *Basis and methods of NASA airborne topographic mapper lidar surveys for coastal studies*. *Journal of Coastal Research*, 18, pp. 1-13.
- BRODU, N. e LAGUE, D. 2012. *3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 68, pp. 121-134.

- BROWELL, E. V., ISMAIL, S. e GRANT, W. B. 1998. *Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space*. Applied Physics B-Lasers and Optics, 67, pp. 399-410.
- BROWELL, E., ISMAIL, S. e GRANT, W. 2005. *Airborne Lidar Systems*. In: FUJII, M. & FUKUCHI, T. (eds.) *Laser Remote Sensing*. New York: CRC Press, pp. 723-779.
- BRUNNER, G. W. 2008. *HEC-RAS, River Analysis System - Hydraulic Reference Manual*. Disponível em: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.0_Reference_Manual.pdf. Acedido a 10 de agosto de 2012, 411 p.
- BRUNSDON, C. 2009. *Geostatistical Analysis of LiDAR Data*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 67-81.
- BUFTON, J. L. e BLAIR, B. 1996. *Space Laser Altimetry - Laser Engineering for Multi-Beam Applications*. The Review of Laser Engineering, 24, pp. 1285-1292.
- BURTCH, R. 2002. *LiDAR Principles and applications*. 2002 IMAGIN Conference [Online]. Disponível em: http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/papers/lidar_principles.pdf. Acedido a 15 de outubro de 2011, 13 p.
- CAMPBELL, J. B. e WYNNE, R. H. 2011. *Introduction to Remote Sensing*, Fifth Edition, New York, London, The Guilford Press, 684 p.
- CARLSSON, T., STEINVALL, O. e LETALICK, D. 2001. *Signature simulation and signal analysis for 3-D laser radar*. Technical Report FOI-R-0163-SE. Linköping, Sweden: Department of Electrical Engineering, Linköping Universitet, 66 p.
- CASACA, J., MATOS, J. e BAILO, M. 2005. *Topografia Geral*, Lisboa, Lidel- Edições Técnicas, Lda, 408 p.
- CHARLTON, M. E., COVENEY, S. J. e MCCARTHY, T. 2009. *Issues in Laser Scanning*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 35-48.
- CRACKNELL, A. P. e HAYES, L. W. B. 1991. *Introduction To Remote Sensing*, London; New York; Philadelphia, Taylor & Francis, 293 p.
- CRUTCHLEY, S. 2009. *Using LiDAR in Archaeological Contexts: The English Heritage Experience and Lessons Learned*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 180-200.
- DANSON, F. M., MORSDORF, F. e KOETZ, B. 2009. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning for Measuring Vegetation Canopy Structure*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 201-219.
- DEVEREUX, B. e AMABLE, G. 2009. *Airborne LiDAR: Instrumentation, Data Acquisition and Handling*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 49-66.
- DONGZHEN, J., KHOON, T. Y., ZHENG, Z. e QI, Z. 2009. *Indoor 3D Modeling and Visualization with a 3D Terrestrial Laser Scanner*. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (eds.) *3D Geo-Information Sciences*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 247-255.
- DRAKE, J. B., DUBAYAH, R. O., CLARK, D. B., KNOX, R. G., BLAIR, J. B., HOFTON, M. A., CHAZDON, R. L., WEISHAMPEL, J. F. e PRINCE, S. D. 2002. *Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar*. Remote Sensing of Environment, 79, pp. 305-319.
- ELACHI, C. e VAN ZYL, J. 2006. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*, Hoboken, N.J., Wiley-Interscience, 552 p.
- ELMQVIST, M. 2001. *Ground estimation of laser radar data using active shape models*. In: TORLEGÅRD, K. & NELSON, J., eds. *OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, 2001. Stockholm, Sweden. OEEPE, 8 p.
- EL-SHEIMY, N. 2008. *Georeferencing Component of LiDAR Systems*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 195-214.
- EL-SHEIMY, N., VALEO, C. e HABIB, A. 2005. *Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation, and Applications*, Boca Raton; London; New York; Washington, DC, CRC Press, 257 p.

- ENTWISTLE, N. S. e FULLER, I. C. 2009. *Terrestrial Laser Scanning to Derive Surface Grain Size Facies Character of Gravel Bars*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 102-114.
- EVANS, J., HUDAK, A., FAUX, R. e SMITH, A. M. 2009. *Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables*. *Remote Sensing*, 1, pp. 776-794.
- FERNANDES, P., GONÇALVES, G., PEREIRA, L. e MOREIRA, M. 2009. *Use of LiDAR data and multispectral images for urban flood modelling: State of Art*. In: ANDRADE, C., ed. *International Conference on Ecohydrology and Climate Change - EcoHCC'09*. Tomar. Polytechnic Institute of Tomar, Mathematical Department of the Business School, pp. 1-14.
- FERRAZ, A., BRETAR, F., JACQUEMOUD, S. e GONÇALVES, G. 2009. *The Role of Lidar Systems in Fuel Mapping*. INESC Coimbra Research Reports N.º 13. Coimbra: INESC - Coimbra, 37 p.
- FERRAZ, A., BRETAR, F., JACQUEMOUD, S., GONÇALVES, G., PEREIRA, L., TOMÉ, M. e SOARES, P. 2012. *3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data*. *Remote Sensing of Environment*, 121, pp. 210-223.
- FILIN, S. 2004. *Surface classification from airborne laser scanning data*. *Computers & Geosciences*, 30, pp. 1033-1041.
- FILIN, S. e VOSSelman, G. 2004. *Adjustment of Airborne Laser Altimetry Strips*. In: ALTAN, O., ed. *ISPRS Congress Istanbul 2004*. Istanbul, Turkey. ISPRS, pp. 285-289.
- FLAMANT, P. H. 2005. *Atmospheric and meteorological Lidar: from pioneers to space applications*. *Comptes Rendus Physique*, 6, pp. 864-875.
- GARVIN, J., BUFTON, J., BLAIR, J., HARDING, D., LUTHCKE, S., FRAWLEY, J. e ROWLANDS, D. 1998. *Observations of the Earth's Topography from the Shuttle Laser Altimeter (SLA): Laser-pulse Echo-recovery Measurements of Terrestrial Surfaces*. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23, pp. 1053-1068.
- GIARDINO, M. J. 2012. *NASA Remote Sensing and Archaeology*. In: LASAPONARA, R. & MASINI, N. (eds.) *Satellite Remote Sensing- A New Tool for Archaeology*. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, pp. 157-176.
- GOMES, N. 2011. *Integração de dados LiDAR com imagens de muito alta resolução espacial para determinação de áreas urbanas com potencial solar*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 104 p.
- GONÇALVES, G. 2005. *Análise do erro de interpolação em Modelos digitais de superfície urbanos obtidos por varrimento laser*. In: CASACA, J. & MATOS, J., eds. *IV Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Lisboa. Lidel, pp. 23-32.
- GONÇALVES, G. 2006. *Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from LiDAR data*. In: CAETANO, M. & PAINHO, M., eds. *7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Lisboa. Instituto Geográfico Português, pp. 160-168.
- GONÇALVES, G. e GONÇALVES-SECO, L. 2007. *Utilização de dados LiDAR na classificação de objectos situados em zonas rurais*. In: CASACA, J. & MATOS, J., eds. *V Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Lidel, pp. 167-176.
- GONÇALVES, G. e JALOBÉANU, A. 2011. *LiDAR bore-sight calibration: a comparative study (poster)*. AGU Fall Meeting. São Francisco, Califórnia, EUA.
- GONÇALVES, G. e PEREIRA, L. 2010a. *Assessment of the performance of eight filtering algorithms by using LiDAR data of unmanaged eucalypt forest (poster)*. *Silvilaser 2010, the 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*. Freiburg.
- GONÇALVES, G. e PEREIRA, L. 2010b. *Integração de dados LiDAR e Imagens CIR na extração de Modelos Digitais de Terreno em Zona Urbana: Resultados Preliminares*. *Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica - ESIG 2010*. Oeiras. (in press), 9 p.

- GONCALVES, G. R. e PEREIRA, L. G. 2012. *A Thorough Accuracy Estimation of DTM Produced From Airborne Full-Waveform Laser Scanning Data of Unmanaged Eucalypt Plantations*. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50, pp. 3256-3266.
- GONÇALVES, G., SANTOS, J. e CORTÊS, N. 2011. *Avaliação da qualidade de modelos digitais de terreno obtidos por lidar em ambiente urbano : um caso de estudo*. In: CASACA, J., ed. *Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. CNCG2011. Coordenadas para o Futuro. Livro de resumo*. Porto: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto 25 p.
- GONÇALVES-SECO, L., GONZÁLEZ-FERREIRO, E., DIÉGUEZ-ARANDA, U., FRAGA-BUGALLO, B., CRECENTE, R. e MIRANDA, D. 2011. *Assessing the attributes of high-density Eucalyptus globulus stands using airborne laser scanner data*. *International Journal of Remote Sensing*, 32, pp. 9821-9841.
- GONÇALVES-SECO, L., MIRANDA, M., CRECENTE, R. e FARTO, J. 2006. *Digital Terrain Model generation using airborne LIDAR in florested area of Galicia, Spain*. In: CAETANO, M. & PAINHO, M., eds. *7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Lisboa, Portugal. pp. 169-180.
- GONGA-SAHOLIARILIVA, N., GUNNELL, Y., HARBOR, D. e MERING, C. 2011. *An automated method for producing synoptic regional maps of river gradient variation: Procedure, accuracy tests, and comparison with other knickpoint mapping methods*. *Geomorphology*, 134, pp. 394-407.
- GOUDIE, A. S. 2004. *Encyclopedia of Geomorphology*, London, Routledge, 1156 p.
- GRAHAM, L. 2008. *Management of LiDAR Data*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 295-306.
- GÜLCH, E., KAATRINEN, H. e HYYPPÄ, J. 2008. *Quality of Buildings Extracted from Airborne Laser Scanning Data*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 536-573.
- HABIB, A. 2008a. *Accuracy, Quality Assurance, and Quality Control of LiDAR Data*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 269-294.
- HABIB, A. 2008b. *Integration of LiDAR and Photogrammetric Data*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 371-401.
- HALOUNOVÁ, L. e DOLANSKÝ, T. 2009. *3D models of trees for the Discrete Anisotropic Radiative Transfer model*. In: MAKTAV, D. (ed.) *Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories*, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008. Istanbul, Turkey: IOS Press, pp. 263-269.
- HARDING, D. 2008. *Pulsed Laser Altimeter Ranging Techniques and Implications for Terrain Mapping*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 173-194.
- HERITAGE, G. L. e LARGE, A. R. G. 2009. *Principles of 3D Laser Scanning*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 21-34.
- HETHERINGTON, D. 2009. *Laser Scanning: Data Quality, Protocols and General Issues*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 82-101.
- HODGETTS, D. 2009. *LiDAR in the Environmental Sciences: Geological Applications*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 165-179.
- HOEFLE, B. e PFEIFER, N. 2007. *Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, pp. 415-433.
- HU, Y. 2003. *Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data*. Tese de Doutoramento, The University of Calgary, 206 p.
- HUISING, E. J. e PEREIRA, L. M. G. 1998. *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, pp. 245-261.

- HYYPÄ, J., HYYPÄ, H., YU, X., KAARTINEN, H., KUKKO, A. e HOLOPAINEN, M. 2008. *Forest Inventory Using Small-Footprint Airborne LiDAR*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 336-369.
- IRISH, J. L. e LILLYCROP, W. J. 1999. *Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 123-129.
- ISENBURG, M. s.d. *LASzip: lossless compression of LiDAR data*. Disponível em: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/download/laszip.pdf>. Acedido a 16 de Janeiro de 2012, 9 p.
- JACOBSEN, K. 2009. *3D-Remote sensing, Status Report 2008*. In: MAKTA, D. (ed.) *Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories*, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008. Istanbul, Turkey: IOS Press, pp. 6-15.
- JALOBÉANU, A. e GONÇALVES, G. 2011. *Probabilistic topographic maps from raw, full-waveform airborne LiDAR data (oral)*. AGU Fall Meeting. São Francisco, Califórnia, EUA.
- JALOBÉANU, A. e GONÇALVES, G. 2012. *The full-waveform LiDAR Riegl LMS-Q680i: from reverse engineering to sensor modeling*. ASPRS 2012: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference. Sacramento, Califórnia, EUA. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 9 p.
- KING, A. D. 1998. *Inertial Navigation – Forty Years of Evolution*. In: COLLIER, M. J. (ed.) *GEC Review*. General Electric Co., 140-149 p.
- KIVILCIM, C. O. 2009. *Architectural survey for documentation of cultural heritage with new sensor technologies*. In: MAKTA, D. (ed.) *Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories*, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008. Istanbul, Turkey: IOS Press, pp. 543-550.
- KONECNY, G. 2003. *Geoinformation: Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*, London, Taylor & Francis, 246 p.
- KRABILL, W. B., THOMAS, R. H., MARTIN, C. F., SWIFT, R. N. e FREDERICK, E. B. 1995. *Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet*. International Journal of Remote Sensing, 16, pp. 1211-1222.
- KRAUS, K. e PFEIFER, N. 1998. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, pp. 193-203.
- LALONDE, J.-F., VANDAPÉL, N., HUBER, D. F. e HEBERT, M. 2006. *Natural terrain classification using three-dimensional Ladar data for ground robot mobility*. Journal of Field Robotics, pp. 839-861.
- LARGE, A. R. G. e HERITAGE, G. L. 2009. *Laser Scanning – Evolution of the Discipline*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester, Wiley-Blackwell, pp. 1-20.
- LARGE, A. R. G., HERITAGE, G. L. e CHARLTON, M. E. 2009. *Laser Scanning: The Future*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester, Wiley-Blackwell, pp. 262-271.
- LEDREW, E. F. e RICHARDSON, L. L. 2006. *Recommendations for scientists and managers for application of remote sensing to coastal waters*. In: RICHARDSON, L. L. & LEDREW, E. F. (eds.) *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Applications*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 307-324.
- LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., ACKER, S. A., PARKER, G. G., SPIES, T. A. e HARDING, D. 1999a. *Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests*. Remote Sensing of Environment, 70, pp. 339-361.
- LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., PARKER, G. G. e HARDING, D. J. 2002. *Lidar remote sensing for ecosystem studies*. Bioscience, 52, pp. 19-30.
- LEFSKY, M. A., HARDING, D., COHEN, W. B., PARKER, G. e SHUGART, H. H. 1999b. *Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA*. Remote Sensing of Environment, 67, pp. 83-98.

- LEFSKY, M. A., RAMOND, T. e WEIMER, C. S. 2011. *Alternate spatial sampling approaches for ecosystem structure inventory using spaceborne lidar*. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 1361-1368.
- LEICA. 2008a. *Leica ALS60 - Airborne Laser Scanner Product Specifications*. Disponível em: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/als60/product-specification/ALS60_ProductSpecs_en.pdf. Acedido a 30 de Julho de 2012, 12p.
- LEICA. 2008b. *Leica ALS70-CM - City Mapping Airborne LIDAR Product Specifications*. Disponível em: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/ALS70/product-specification/ALS70CM_ProductSpecs_en.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 12p.
- LEICA. 2008c. *Leica ALS Corridor Mapper - Airborne Laser Corridor Mapper Product Specifications*. Disponível em: http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/airborne/alscorridor/product-specification/Leica_ALS_CorridorMapper_Specifications_EN.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 12p.
- LEMMENS, M. 2009. *Airborne Lidar Sensors*. GIM Internacional, 23, pp. 16-19.
- LEMMENS, M. 2011. *Geo-Information: Technologies, Applications and the Environment*, Dordrecht; Heidelberg; London; New York, Springer, 349 p.
- LI, Z., ZHU, Q. e GOLD, C. 2004. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, Boca Raton; London; New York; Washington, DC, CRC Press, 323 p.
- LILLESAND, T. M. 2003. *Remote sensing and image interpretation*, New York, Wiley & Sons, 704 p.
- LIM, M., MILLS, J. e ROSSER, N. 2009. *Laser Scanning Surveying of Linear Features: Considerations and Applications*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 245-261.
- LIU, J. G. e MASON, P. 2009. *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*, Chichester, John Wiley & Sons, 460 p.
- LOHANI, B. e MASON, D. C. 2001. *Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, pp. 100-120.
- LOUREIRO, J. M. 1984. *Expressão para o Cálculo do Caudal Máximo de Cheia em Cursos de Água de Portugal*. *Recursos Hídricos - Lisboa*, 5, pp. 53-78.
- LUTHCKE, S. 2002. *Introduction*. *Journal of Geodynamics*, 34, pp. 343-345.
- MAINI, A. K. e AGRAWAL, V. 2011. *Satellite technology principles and applications*, Chichester, John Wiley & Sons, 576 p.
- MALLET, C. e BRETAR, F. 2009. *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp. 1-16.
- MANDLBURGER, G., BRIESE, C. e PFEIFER, N. 2007. *Progress in LiDAR sensor technology – chance and challenge for DTM generation and data administration*. In: FRITSCH, D., ed. *51th Photogrammetric Week*. Heidelberg. Herbert Wichmann Verlag, pp. 159-169.
- MATHER, P. M. 2004. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*, Chichester, John Wiley & Sons, 350 p.
- MILAN, D. J. 2009. *Terrestrial Laser Scan-Derived Topographic and Roughness Data for Hydraulic Modelling of Gravel-Bed Rivers*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 133-146.
- MOORTHY, I., MILLER, J. R., HU, B. X., CHEN, J. e LI, Q. M. 2008. *Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data*. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34, pp. 320-332.
- NEVES, D. e GONÇALVES, G. 2007. *Utilização de Imagens de Alta Resolução e Modelos Digitais de Alturas na Identificação Individual de Árvores*. In: CASACA, J. & MATOS, J., eds. *V Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Lisboa. Lidel, pp. 177-184.
- OGUCHI, T., S, H. Y. e WASKLEWICZ, T. 2011. *Data Sources*. In: MIKE J. SMITH, PARON, P. & JAMES, S. G. (eds.) *Developments in Earth Surface Processes*. Elsevier, pp. 189-224.
- OLSEN, R. C. 2007. *Remote sensing from air and space*, Bellingham, Wash., SPIE Press, 255 p.

- OPTECH. s.d.-a. *Gemini - Summary Specification Sheet*. Disponível em: <http://www.optech.ca/pdf/Gemini-SpecSheet-120605-WEB.pdf>. Acedido a 30 de Julho de 2012, 2 p.
- OPTECH. s.d.-b. *Orion M/C 200 - Summary Specification Sheet*. Disponível em: http://www.optech.ca/pdf/ALTM_Orion_SpecSheet_110708web.pdf. Acedido a 30 de Julho de 2012, pp. 2.
- OPTECH. s.d.-c. *Pegasus HD500 - Summary Specification Sheet*. Disponível em: http://www.optech.ca/pdf/ALTM_Pegasus_SpecSheet_120105_Web.pdf. Acedido a 30 de Julho de 2012, pp. 2.
- OVERTON, I. C., SIGGINS, A., GALLANT, J. C., PENTON, D. e BYRNE, G. 2009. *Flood Modelling and Vegetation Mapping in Large River Systems*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 220-244.
- PAINE, D. P. e KISER, J. D. 2012. *Aerial Photography and Image Interpretation*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 629 p.
- PEREIRA, L. e GONÇALVES, G. 2010. *Accuracy of a DTM Derived from Full-waveform LiDAR Data under an Unstructured Eucalyptus Forest*. XXIV FIG International congress 2010, facing the challenges, building the capacity. Sydney. FIG - Internacional Federation of Suurveyors, 16 p.
- PEREIRA, L. 2005. *Varrimento aéreo por laser: princípios e estado da arte*. In: CASACA, J. & MATOS, J., eds. *IV Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Lisboa. Lidel, pp. 313-323.
- PEREIRA, L., GONÇALVES, G., SOARES, P. e TOMÉ, M. 2009a. *Forest and Fuel Variables Estimation and Digital Terrain Modelling with Airborne Laser Scanning and High Resolution Multi-Spectral Images*. 6º Congresso Florestal Nacional. Ponta Delgada. Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais, pp. 679-683.
- PEREIRA, L., GONÇALVES, G., SOARES, P. e TOMÉ, M. 2009b. *Planning and Acquisition of control data to validate forest inventory and the estimation of fuel variables derived from LiDAR data and high resolution CIR images*. In: FLORESTAIS, S. P. D. C., ed. *6º Congresso Florestal Nacional*. Ponta Delgada. pp. 454-462.
- PETRIE, G. M. e TOTH, C. 2008a. *Airborne and Spaceborne Laser Profilers and Scanners*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 30-85.
- PETRIE, G. M. e TOTH, C. 2008b. *Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 1-27.
- PETRIE, G. M. e TOTH, C. 2008c. *Terrestrial Laser Scanners*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 87-127.
- PFEIFER, N. e BRIESE, C. 2007b. *Laser Scanning – Principles and applications*. Disponível em: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/geosibirPfeifer.pdf>. Acedido a 20 de novembro de 2012, 20 p.
- PFEIFER, N. e BRIESE, C. *Geometrical Aspects of Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, 2007a. Espoo, Finland. IAPRS, pp. 312-319.
- PFEIFER, N. e MANDLBURGER, G. 2008. *LiDAR Data Filtering and DTM Generation*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 308-333.
- PHILLIPS, J. D. e LUTZ, J. D. 2008. *Profile convexities in bedrock and alluvial streams*. *Geomorphology*, 102, pp. 554-566.
- PHILLIPS, J. D., MCCORMACK, S., DUAN, J., RUSSO, J. P., SCHUMACHER, A. M., TRIPATHI, G. N., BROCKMAN, R. B., MAYS, A. B. e PULUGURTHA, S. 2010. *Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River basin, Kentucky-Tennessee*. *Geomorphology*, 114, pp. 188-198.
- RABER, B. e CANNISTRA, J. 2005. *LIDAR Guidebook: Concepts, Project Design, and Practical Applications Primer on Wireless GIS*. Park Ridge: Urban and Regional Information Systems Association (URISA).
- REDDY, M. A. 2008. *Textbook of remote sensing and geographical Information systems*, Hyderabad, BS Publications, 512 p.
- REES, G. 1999. *The remote sensing data book*, Cambridge; New York, Cambridge University Press, 276 p.
- REES, G. 2006. *Remote Sensing Of Snow And Ice*, New York, Taylor & Francis, 312 p.
- REES, W. G. 2001. *Physical principles of remote sensing*, Cambridge, Cambridge University Press, 343 p.

- RIEGL. 2010. *RIEGL LMS-Q560*. Disponível em: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_Data_Sheet_Q560_20-09-2010_01.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 6 p.
- RIEGL. 2012a. *RIEGL LMS-Q680i*. Disponível em: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_Data_Sheet_LMS-Q680i_04-04-2012_01.pdf [Acedido a 30 de julho de 2012], 8 p.
- RIEGL. 2012b. *RIEGL VQ-580*. Disponível em: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_Data_Sheet_VQ-580_02-04-2012_PRELIMINARY.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 6 p.
- RIEGL. 2012c. *RIEGL VQ-820-G*. Disponível em: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_Data_Sheet_VQ-820-G_05-04-2012_PRELIMINARY.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 6 p.
- RODRIGUES, N., LOPES, A., PRÓSPERO DOS SANTOS, M. e GONÇALVES, G. 2005. *Visualização de edifícios a partir de dados LIDAR*. In: ADRIANO, L., ed. *13º Encontro Português de Computação Gráfica*. Vila Real. Grupo Português de Computação Gráfica, pp. 105-110.
- ROOSEVELT DE LARA JR., E., MITISHITA, E. A., VÖGTLE, T. e BÄHR, H.-P. 2009. *Automatic Digital Aerial Image Resection Controlled by LIDAR Data*. In: LEE, J. & ZLATANOVA, S. (eds.) *3D Geo-Information Sciences*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 213-234.
- ROTTENSTEINER, F. e CLODE, S. 2008. *Building and Road Extraction by LiDAR and Imagery*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 421-444.
- ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S. e KUBIK, K. 2007. *Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: Performance evaluation and sensitivity analysis*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62, pp. 135-149.
- ROWLANDS, D. D., CARABAJAL, C. C., LUTHCKE, S. B., HARDING, D. J., SAUBER, J. M. e BUFTON, J. L. 2000. *Satellite Laser Altimetry On-Orbit Calibration Techniques for Precise Geolocation*. The Review of Laser Engineering, 28, pp. 796-803.
- RUTZINGER, M., ELBERINK, S. O., PU, S. e VOSSELMAN, G. 2009. *Automatic Extraction of Vertical Walls from Mobile and Airborne Laser Scanning Data*. In: BRETAR, F., PIERROT-DESEILLIGNY, M. & VOSSELMAN, G., eds. *Laserscanning '09*. Paris, France. ISPRS, pp. 7-11.
- SABINS, F. F. 1997. *Remote sensing: principles and interpretation*, New York, W. H. Freeman, 494 p.
- SALLENGER, A. H., KRABILL, W. B., SWIFT, R. N., BROCK, J., LIST, J., HANSEN, M., HOLMAN, R. A., MANIZADE, S., SONTAG, J., MEREDITH, A., MORGAN, K., YUNKEL, J. K., FREDERICK, E. B. e STOCKDON, H. 2003. *Evaluation of airborne topographic lidar for quantifying beach changes*. Journal of Coastal Research, 19, pp. 125-133.
- SANTOS, J. 2011. *Avaliação da Precisão de um Modelo Digital do Terreno Obtido por Varrimento Laser em Ambiente Urbano*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- SARMENTO, C. 2010. *Contributo dos dados LiDAR para o Inventário Florestal Municipal*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 60 p.
- SCHOTT, J. R. 2007. *Remote sensing the image chain approach*, New York, Oxford University Press, 666 p.
- SHAN, J. e TOTH, C. K. 2009. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, New York, CRC Press, 593 p.
- SINGH, U., ISMAIL, S., KAVAYA, M., WINKER, D. e AMZAJERDIAN, F. 2005. *Space-Based Lidar*. In: FUJII, T. & FUKUCHI, T. (eds.) *Laser Remote Sensing*. Boca Raton; London; New York; Singapore: Taylor & Francis, pp. 781-881.
- SITHOLE, G. e VOSSELMAN, G. 2004. *Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59, pp. 85-101.
- SITHOLE, G. e VOSSELMAN, G. 2006. *Bridge detection in airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61, pp. 33-46.

- SITHOLE, G. 2001. *Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter*. In: HOFTON, M., ed. *Land surface mapping and characterization using laser altimetry*. Annapolis, Maryland, USA. ISPRS, pp. 203-210.
- SMITH, M., PARON, P. e GRIFFITHS, J. A. 2011. *Geomorphological mapping methods and applications*, Amsterdam; London, Elsevier Science, 610 p.
- SOHN, G. e DOWMAN, I. 2007. *Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62, pp. 43-63.
- SOHN, G., HUANG, X. e TAO, V. 2008. *A Data-Driven Method for Modeling 3D Building Objects Using a Binary Space Partitioning Tree*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 479-509.
- STAREK, M. J., SLATTON, K. C., SHRESTHA, R. L. e CARTER, W. E. 2009. *Airborne LiDAR Measurements to Quantify Change in Sandy Beaches*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 147-164.
- STEINVALL, O. 2000. *Waveform simulation for 3-D sensing laser radars*. Technical Report FOI-R-1530-SE. Linköping, Sweden: Department of Electrical Engineering, Linköping Universitet, 37 p.
- STILLA, U. e JUTZI, B. 2008. *Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser Systems*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 215-234.
- STOCKDON, H. F., SALLENGER, A. H., LIST, J. H. e HOLMAN, R. A. 2002. *Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data*. Journal of Coastal Research, 18, pp. 502-513.
- STRAHLER, A. 1957. *Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology*, New York, Defense Technical Information Center, 8 p.
- STRAUB, C., WANG, Y. e IERCAN, O. 2009. *Airborne Laser Scanning: Methods for Processing and Automatic Feature Extraction for Natural Artificial Objects*. In: HERITAGE, G. L. & LARGE, A. R. G. (eds.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester: Wiley-Blackwell, pp. 115-132.
- TEEUW, R. M. 2007. *Mapping Hazardous Terrain Using Remote Sensing*, London, Geological Society of London, 169 p.
- TOTH, C. 2008. *Strip Adjustment and Registration*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 235-268.
- TRIMBLE. 2009. *GeoExplorer® 2008 series - User Guide*. Disponível em: http://bss.sfsu.edu/jdavis/field/GeoExpl2008_100C_%20UserGde_ENG.pdf. Acedido a 20 de agosto de 2012, pp. 134.
- TRIMBLE. 2011a. *Trimble Harrier 56 - Corridor Mapping System*. Disponível em: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-457941/022515-100B_Trimble_Harrier_DS_0509_LR.pdf. Acedido a 30 de julho de 2012, 2 p.
- TRIMBLE. 2011b. *Trimble Harrier 68i - Corridor Mapping System*. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-560731/>. Acedido a 30 de julho de 2012, 2 p.
- TURNER, W., SPECTOR, S., GARDINER, N., FLADELAND, M., STERLING, E. e STEININGER, M. 2003. *Remote sensing for biodiversity science and conservation*. Trends in Ecology & Evolution, 18, pp. 306-314.
- VAN LEEUWEN, M. e NIEUWENHUIS, M. 2010. *Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing*. European Journal of Forest Research, 129, pp. 749-770.
- VANDAPPEL, N., HUBER, D. F., KAPURIA, A. e HEBERT, M. 2004. *Natural terrain classification using 3-D Ladar data*. ICRA'04. New Orleans, USA. IEEE, pp. 5117-5122.
- VELHAS, E. 1991. *A Bacia Hidrográfica do Rio Leça - Estudo Hidroclimatológico*. Revista da Faculdade de Letras - Geografia, Vol. VII, 1ª série, pp. 139-251.
- VOSSSELMAN, G. e MAAS, H. G. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, New York, Taylor & Francis, 320 p.

- VOSSSELMAN, G. e MAAS, H. G. 2001. *Adjustment and filtering of raw laser altimetry data*. In: TORLEGÅRD, K. & NELSON, J., eds. *OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*. Stockholm, Sweden. OEEPE, pp. 62-72.
- VOSSSELMAN, G., KESSELS, P. e GORTE, B. 2005. *The utilisation of airborne laser scanning for mapping*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6, pp. 177-186.
- WANG, M. A. e TSENG, Y. H. 2011. *Incremental segmentation of lidar point clouds with an octree-structured voxel space*. Photogrammetric Record, 26, pp. 32-57.
- WEBSTER, T. L. e DIAS, G. 2006. *An automated GIS procedure for comparing GPS and proximal LIDAR elevations*. Computers & Geosciences, 32, pp. 713-726.
- WEBSTER, T. L. e FORBES, D. L. 2006. *Airborne Laser Altimetry for predictive modeling of costar storm-surge flooding*. In: RICHARDSON, L. L. & LEDREW, E. F. (eds.) *Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 157-182.
- WEHR, A. 2008b. *LiDAR Systems and Calibration*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 129-172.
- WEHR, A. e LOHR, U. 1999. *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp. 68-82.
- WEITKAMP, C. 2005. Lidar. In: FUJII, T. & FUKUCHI, T. (eds.) *Laser Remote Sensing*. Boca Raton; London; New York; Singapore: CRC Press, pp. 1-36.
- WERBROUCK, I., ANTROP, M., VAN EETVELDE, V., STAL, C., DE MAEYER, P., BATS, M., BOURGEOIS, J., COURT-PICON, M., CROMBE, P., DE REU, J., DE SMEDT, P., FINKE, P. A., VAN MEIRVENNE, M., VERNIERS, J. e ZWERTVAEGHER, A. 2011. *Digital Elevation Model generation for historical landscape analysis based on LiDAR data, a case study in Flanders (Belgium)*. Expert Systems with Applications, 38, pp. 8178-8185.
- WINKER, D. M., COUCH, R. H. e MCCORMICK, M. P. 1996. *An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment*. Proceedings of the IEEE, 84, pp. 164-180.
- WINKER, D. M., HUNT, W. H. e MCGILL, M. J. 2007. *Initial performance assessment of CALIOP*. Geophys. Res. Lett., 34, pp. 19803-19807.
- ZABAVNIKOV, V. e EGOROV, S. 2009. *Using of Airborne LIDAR for research carrying out in the interest of fisheries oceanography information providing*. In: MAKTAV, D. (ed.) *Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008*. Istanbul, Turkey: IOS Press, pp. 587-593.
- ZHANG, K., YAN, J. e CHEN, S.-C. 2008. *A Framework for Automated Construction of Building Models from Airborne LiDAR Measurements*. In: SHAN, J. & TOTH, C. (eds.) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. New York: CRC Press, pp. 511-534.
- ZWALLY, H. J., SCHUTZ, B., ABDALATI, W., ABISHIRE, J., BENTLEY, C., BRENNER, A., BUFTON, J., DEZIO, J., HANCOCK, D., HARDING, D., HERRING, T., MINSTER, B., QUINN, K., PALM, S., SPINHIRNE, J. e THOMAS, R. 2002. *ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land*. Journal of Geodynamics, 34, pp. 405-445.

ENDERECOS ELETRÓNICOS

- AHAB. s.d.-a. *DragonEye - Technical specification* [Online]. AHAB - Airborne Hydrography AB. Disponível em: <http://www.airbornehydrography.com/dragoneye-technical-specification>. Acedido a 30 de julho de 2012.
- AHAB. s.d.-b. *Hawkeye II - Technical specification* [Online]. AHAB - Airborne Hydrography AB. Disponível em: <http://www.airbornehydrography.com/hawkeye-ii-technical-specification>. Acedido a 30 de julho de 2012.
- ASPRS. s.d. *Common Lidar Data Exchange Format - .LAS Industry Initiative* [Online]. ASPRS - American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Disponível em: http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/lidar_format.html. Acedido a 16 de janeiro de 2012.

- CNIG. 2008. *Metadatos serie MDT05* [Online]. Instituto Geográfico Nacional. Ministério de Fomento. Disponível em: ftp://ftpcdd.cnig.es/PUBLICACION_CNIG_DATOS_VARIOS/MDT05/Metadatos_serie_MDT05.xml. Acedido a 14 de fevereiro de 2012.
- CNIG. 2012. *Catálogo de productos - Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica* [Online]. Instituto Geográfico Nacional. Ministério de Fomento. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/cambiarMenu.do?destino=catalogo>. Acedido a 14 de fevereiro de 2012.
- LEICA. 2007. *Leica ALS50-II - Airborne Laser Scanner Product Specifications*. Disponível em: http://www.leica-geosystems.com/en/About-us-News_360.htm?id=1250. Acedido a 30 de julho de 2012.
- AutoProbaDTM Project- Disponível em: <https://sites.google.com/site/autoprobadtm/home>. Várias consultas.

CARTOGRAFIA/ DADOS DE BASE

- AGÊNCIA ESTATAL DE METEOROLOGIA (2012). *Valores climatológicos normales- Pontevedra*. Ministério de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponível em: <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=1484C&k=gal>. Acedido a 10 de janeiro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (2006). *Base Topográfica Nacional à escala 1:25000, folhas n.ºs 260-4 e 261-3* (suporte digital – ficheiros vetoriais). Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 20 de setembro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (2008). *Modelo Digital de Elevação (5 metros de resolução), folhas n.ºs 260 2 e 261* (suporte digital – ficheiros matriciais). Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 20 de setembro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (2009). *CORINE Land Cover 2006 (NÍVEL 3)* (Suporte digital – ficheiros matriciais). Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 30 de outubro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (s.d.). *Base Cartográfica Nacional à escala 1:200000* (suporte digital – ficheiros vetoriais). Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 20 de setembro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (s.d.). *Base Cartográfica Nacional à escala 1:200000 - Pontevedra*. (suporte digital – ficheiros vetoriais). Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 20 de setembro de 2011.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO PORTUGUÊS (2011). *Carta Administrativa Oficial de Portugal 2011*. (suporte digital – ficheiros vetoriais). Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. Disponível em: <http://www.igeo.pt/produtos/cadastro/caop/versao2011.htm>. Acedido a 25 de setembro de 2011.
- PLAN NACIONAL DE ORTOFOTOGRAFÍA AÉREA- PNOA (2008). *Ortofoto Máxima Resolución (0,25 metros), folhas n.ºs 260 e 261* (Suporte digital – ficheiros matriciais). Instituto Geográfico Nacional. Ministério de Fomento, Espanha. Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/encuestas.do>. Acedido a 20 de setembro de 2011.
- PLAN NACIONAL DE ORTOFOTOGRAFÍA AÉREA- PNOA (2010). *Levantamento Airborne Laser Scanning ficheiros n.ºs 508-4656, 508-4658, 508-4660, 510-4654, 510-4656, 510-4658, 510-4660, 512-4654, 512-4656, 512-4658, 512-4660, 514-4654, 514-4656, 514-4658 e 514-4660* (suporte digital – ficheiros vetoriais). Instituto Geográfico Nacional. Ministério de Fomento, Espanha..
- XUNTA DE GALICIA (2003). *Base Topográfica da Galiza à escala 1:5000, folhas n.ºs 260-57, 260-58, 260-67, 260-68, 260-78, 260-88, 261-51, 261-61, 261-71 e 261-81* (suporte digital – ficheiros vetoriais). Xunta de Galicia, Espanha.

7. ANEXOS

Anexo 1

Designações mais frequentes	Exemplos de autores	Outras designações encontradas	Exemplos de autores
LiDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>)	A designação LiDAR é a mais comum e pode ser encontrada na generalidade da literatura sobre o assunto e na Internet	<i>Laser Scanning</i>	(Huising e Pereira, 1998; Kraus e Pfeifer, 1998; Ackermann, 1999; Baltsavias, 1999c; Wehr e Lohr, 1999; Sithole e Vosselman, 2004; Vosselman <i>et al.</i> , 2005; Hoefle e Pfeifer, 2007; Sohn e Dowman, 2007; Gülch <i>et al.</i> , 2008; Halounová e Dolanský, 2008; Hyypä <i>et al.</i> , 2008; Petrie e Toth, 2008b; Pfeifer e Mandlbürger, 2008; Stilla e Jutzi, 2008; Wehr, 2008b; a; Charlton <i>et al.</i> , 2009; Heritage e Large, 2009; Hetherington, 2009; Large e Heritage, 2009; Large <i>et al.</i> , 2009; Mallet e Bretar, 2009; Rutzinger <i>et al.</i> , 2009; Baruch e Filin, 2011; Lemmens, 2011; Wang e Tseng, 2011)
		<i>Laser Altimetry</i>	(Lefsky <i>et al.</i> , 1999b; Sithole, 2001; Vosselman e Maas, 2001; Lefsky <i>et al.</i> , 2002; Luthcke, 2002; Filin, 2004; Mather, 2004; Browell <i>et al.</i> , 2005; Vosselman <i>et al.</i> , 2005; Webster e Dias, 2006; Teeuw, 2007; Liu e Mason, 2009; Mallet e Bretar, 2009; Werbrouck <i>et al.</i> , 2011; Paine e Kiser, 2012)
		<i>Laser radar</i>	(Wehr e Lohr, 1999; Steinvall, 2000; Carlsson <i>et al.</i> , 2001; Elmqvist, 2001; Flamant, 2005; Argall e Sica, 2007; Olsen, 2007)
		<i>LADAR (LASER Detection and Ranging)</i>	(Wehr e Lohr, 1999; Mather, 2004; Vandapel <i>et al.</i> , 2004; Lalonde <i>et al.</i> , 2006; Hoefle e Pfeifer, 2007)
		<i>Laser Induced Direction and Ranging</i>	(Large e Heritage, 2009)
		<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>	(Lemmens, 2011)
<i>Spaceborne LiDAR</i>	(Rees, 2001; Singh <i>et al.</i> , 2005; Danson <i>et al.</i> , 2009)	<i>Spaceborne Laser Scanning</i>	(Baltsavias, 1999b)
<i>Airborne Laser Scanning (ALS)</i>	(Ackermann, 1999; Baltsavias, 1999a; b; c; Wehr e Lohr, 1999; Luthcke, 2002; Filin, 2004; Sithole e Vosselman, 2004; Vosselman <i>et al.</i> , 2005; Sithole e Vosselman, 2006; Webster e Dias, 2006; Webster e Forbes, 2006; Hoefle e Pfeifer, 2007; Rottensteiner <i>et al.</i> , 2007; Sohn e Dowman, 2007; Teeuw, 2007; El-Sheimy, 2008; Harding, 2008; Hyypä <i>et al.</i> , 2008; Petrie e Toth, 2008c; a; b; Stilla e Jutzi, 2008; Toth, 2008; Wehr, 2008a; Crutchley, 2009; Danson <i>et al.</i> , 2009; Heritage e Large, 2009; Hetherington, 2009; Large e Heritage, 2009; Large <i>et al.</i> , 2009; Lim <i>et al.</i> , 2009; Mallet e Bretar, 2009; Overton <i>et al.</i> , 2009; Roosevelt De Lara Jr. <i>et al.</i> , 2009; Rutzinger <i>et al.</i> , 2009; Straub <i>et al.</i> , 2009; Baruch e Filin, 2011; Beger <i>et al.</i> , 2011; Lemmens, 2011)	<i>Airborne LiDAR</i>	(Browell <i>et al.</i> , 1998; Mather, 2004; Bamber, 2005; Bates <i>et al.</i> , 2005; Browell <i>et al.</i> , 2005; Raber e Cannistra, 2005; Ledrew e Richardson, 2006; Webster e Forbes, 2006; Teeuw, 2007; Bretar, 2008; Hyypä <i>et al.</i> , 2008; Pfeifer e Mandlbürger, 2008; Sohn <i>et al.</i> , 2008; Wehr, 2008a; Zhang <i>et al.</i> , 2008; Brunsdon, 2009; Charlton <i>et al.</i> , 2009; Crutchley, 2009; Devereux e Amable, 2009; Heritage e Large, 2009; Hetherington, 2009; Kivilcim, 2009; Large e Heritage, 2009; Large <i>et al.</i> , 2009; Lim <i>et al.</i> , 2009; Liu e Mason, 2009; Mallet e Bretar, 2009; Overton <i>et al.</i> , 2009; Starek <i>et al.</i> , 2009; Webster <i>et al.</i> , 2009; Zabavnikov e Egorov, 2009; Lemmens, 2011; Wang e Tseng, 2011; Werbrouck <i>et al.</i> , 2011; Brodu e Lague, 2012; Giardino, 2012)
		<i>Airborne Topographic LiDAR</i>	(Stockdon <i>et al.</i> , 2002; Sallenger <i>et al.</i> , 2003; Large e Heritage, 2009; Starek <i>et al.</i> , 2009)
		<i>Aerial Laser Scanning</i>	(Gülch <i>et al.</i> , 2008; Petrie e Toth, 2008b; Halounová e Dolanský, 2009; Lim <i>et al.</i> , 2009)

(Continuação)

Designações mais frequentes	Exemplos de autores	Outras designações encontradas	Exemplos de autores
		<i>Airborne Laser Swath Mapping</i> (ALSM)	(Harding, 2008)
		<i>Airborne Laser Terrain Mapper</i> (ALTM)	(Baltsavias, 1999b; Olsen, 2007)
		<i>Airborne Laser Altimetry</i>	(Krabill <i>et al.</i> , 1995; Baltsavias, 1999b; Filin e Vosselman, 2004; Bates <i>et al.</i> , 2005; Vosselman <i>et al.</i> , 2005; Webster e Forbes, 2006; Teeuw, 2007; Hyypä <i>et al.</i> , 2008; Pfeifer e Mandlbürger, 2008; Danson <i>et al.</i> , 2009; Large e Heritage, 2009; Baruch e Filin, 2011; Campbell e Wynne, 2011)
		<i>Laser Scanning from Air</i>	(Jacobsen, 2009)
		<i>Airborne scanning laser altimetry</i>	(Lohani e Mason, 2001)
		<i>Airborne laser scanner</i>	(Kraus e Pfeifer, 1998)
		<i>Aerial LiDAR</i>	(Boyko e Funkhouser, 2011)
<i>Terrestrial Laser Scanning</i>	(Hoefle e Pfeifer, 2007; Petrie e Toth, 2008c; Pfeifer e Mandlbürger, 2008; Charlton <i>et al.</i> , 2009; Danson <i>et al.</i> , 2009; Entwistle e Fuller, 2009; Large e Heritage, 2009; Large <i>et al.</i> , 2009; Lim <i>et al.</i> , 2009; Milan, 2009; Straub <i>et al.</i> , 2009; Lemmens, 2011; Brodu e Lague, 2012)	<i>Terrestrial LiDAR</i>	(Webster e Dias, 2006; Teeuw, 2007; Charlton <i>et al.</i> , 2009; Devereux e Amable, 2009; Halounová e Dolanský, 2009; Heritage e Large, 2009; Hodgetts, 2009; Large <i>et al.</i> , 2009; Mallet e Bretar, 2009; Boyko e Funkhouser, 2011; Lemmens, 2011; Wang e Tseng, 2011; Brodu e Lague, 2012)
		<i>Static Terrestrial Laser Scanner</i>	(Petrie e Toth, 2008c)
		<i>Ground-based Laser Scanner</i>	(Petrie e Toth, 2008c)
<i>Mobile Laser Scanning</i>	(Rutzinger <i>et al.</i> , 2009; Lemmens, 2011)	<i>Mobile LiDAR</i>	(Brodu e Lague, 2012)
		<i>Terrestrial mobile mapping</i>	(Lemmens, 2011)
		<i>Mobile mapping</i>	(El-Sheimy, 2008; Lemmens, 2011)

Tabela 39- Designações utilizadas na bibliografia de referência para nomear a tecnologia LiDAR e autores que as utilizam

Anexo 2

ATRIBUTO	Tipo de dados		Tamanho		Formato	DESCRIÇÃO
	0-5	6-10	0-5	6-10		
X	long	long	4 bytes	4 bytes	Todos	Valor em X.
Y	long	long	4 bytes	4 bytes	Todos	Valor em Y.
Z	long	long	4 bytes	4 bytes	Todos	Valor em Z.
Intensity	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	Todos	Representação da magnitude do retorno do impulso.
Return Number	3 bits (bit 0 – 2)	4 bits (bit 0 – 3)	3 bit	4 bits	Todos	Número de retorno de um dado impulso – 1, 2, 3, 4 ou 5.
Number of Returns	3 bits (bit 3 – 5)	4 bits (bit 4 – 7)	3 bit	4 bits	Todos	Número total de retornos de um dado impulso.
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit (bit 6)	1 bit	1 bit	Todos	Direção da unidade de varrimento (unidade de deflexão) aquando da saída do impulso. 1-positivo (esquerda-direita); 0- negativo (direita-esquerda).
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit (bit 7)	1 bit	1 bit	Todos	Assume o valor 1 se o valor for o último valor de uma linha de voo, antes de mudar de direção.
Classification	unsigned char	unsigned char	1 bytes		Todos	Representa a classe a que pertence o ponto.
Scan Angle Rank	char	short	1 bytes	2 bytes	Todos	Ângulo de varrimento (arredondado à unidade) a partir do qual o impulso foi emitido. Varia entre +90° e -90°: +90° - lado direito; -90° - lado esquerdo.
User Data	unsigned char	unsigned char	1 bytes	1 bytes	Todos	De utilização livre pelo utilizador.
Point Source ID	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	Todos	Identificação do ficheiro de origem do ponto. 0- Indica que o ponto foi processado.
GPS Time	double	double	8 bytes	8 bytes	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10	Hora do GPS no momento de saída do impulso.
Red	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	2, 3, 5, 7, 8 e 10	O valor do canal vermelho associado com aquele ponto.
Green	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	2, 3, 5, 7, 8 e 10	O valor do canal verde associado com aquele ponto.
Blue	unsigned short	unsigned short	2 bytes	2 bytes	2, 3, 5, 7, 8 e 10	O valor do canal azul associado com aquele ponto.
Wave Packet Descriptor Index	unsigned char	unsigned char	1 bytes	1 bytes	4, 5, 9 e 10	Este valor mais 99 representa o ID de registo da onda. Um valor de 0 indica que não existe informação da onda.
Byte offset to waveform data	unsigned long Long	unsigned long Long	8 bytes	8 bytes	4, 5, 9 e 10	Representa a localização em bytes, do início dos pontos LiDAR, em relação aos dados da onda.
Waveform packet size in bytes	unsigned long	unsigned long	4 bytes	4 bytes	4, 5, 9 e 10	Tamanho, em bytes, dos dados da onda associados com o retorno
Return Point Waveform Location	float	float	4 bytes	4 bytes	4, 5, 9 e 10	O <i>offset</i> em picosegundos (10^{-12}), desde o primeiro valor digitalizado, à localização nos dados da onda em que o retorno foi detetado.
X(t)		float	4 bytes	4 bytes	4, 5, 9 e 10	Parâmetros que definem uma equação paramétrica linear para extrapolar os pontos ao longo da onda associada.
Y(t)		float	4 bytes	4 bytes	4, 5, 9 e 10	
Z(t)		float	4 bytes	4 bytes	4, 5, 9 e 10	
Classification Flags		4 bits (bits 0 - 3)	-	4 bits	6, 7, 8, 9 e 10	Utilizado para indicar características especiais associadas com o ponto.
Scanner Channel		2 bits (bits 4 - 5)	-	2 bits	6, 7, 8, 9 e 10	Utilizado para indicar o canal (scanner) de um sistema composto por múltiplos canais- 0 é utilizado ara um sistema composto apenas por um scanner. Suporta até
NIR	-	unsigned short	-	4 bytes	8 e 10	Valor do canal infravermelho próximo associado com aquele ponto

Tabela 40- Atributos dos ficheiros LAS e formatos de gravação

Anexo 3

ANÁLISE LINEAR		Expressão designatória
L_t	Comprimento total dos cursos de água (Km)	-
L_{rp}	Comprimento do Rio Principal (Km)	-
L_p	Extensão média do percurso superficial (Km)	$L_p = \frac{1}{2Dd}$
Gr	Gradiente do rio principal (m)	$Gr = \frac{H - h}{L_{rp}}$
n	Número de segmentos	-
	Classificação da ordem dos rios da Rede Hidrográfica segundo a classificação de <i>Strahler</i>	-
	Comprimento total dos rios da Rede Hidrográfica por ordem, segundo a classificação de <i>Strahler</i> (Km)	-
	Comprimento médio dos rios da Rede Hidrográfica por ordem, segundo a classificação de <i>Strahler</i> (Km)	-
	Comprimento do curso de água (troço) dimensão maior (Km)	-
	Comprimento do curso de água de dimensão menor (Km)	-
L_{fp}	Comprimento do maior percurso de escoamento (Km) (<i>Longest Flow Path Length</i>)	-
M_{fp}	Comprimento da principal linha de escoamento (Km) (<i>Main Flow Path</i>)	-
Sin	Sinuosidade	$Sin = \frac{L_{rp}}{L}$
ANÁLISE AREAL		
A	Área da bacia (km ²)	-
P	Perímetro da bacia (Km)	-
L	Comprimento da bacia (Km)	-
l	Largura da bacia	-
	Área drenada pelo segmento maior (Km ²)	-
I_{co}	Relação entre o comprimento e área da bacia	$I_{co} = \frac{L}{\sqrt{A}}$
Kc	Coefficiente de compacidade ou Índice de Gravelius	$Kc = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$
Lc	Relação entre a largura e comprimento da bacia	$Lc = \frac{L}{l}$
Ia	Índice de alongamento	$Ia = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L}$
Ic	Índice de circularidade	$Ic = \frac{4\pi A}{P^2}$
Kf	Fator de Forma	$Kf = \frac{A}{L_{rp}^2}$
Dd	Densidade de drenagem (Km/Km ²)	$Dd = \frac{L_t}{A}$
Dn	Densidade de segmentos da bacia (nº de rios/ Km ²)	$Dn = \frac{\sum n}{A}$
Dh	Densidade hidrográfica (rios 1ª ordem/Km ²)	$Dn = \frac{n_{1^a}}{A}$
Cm	Coefficiente de manutenção (m ² /m).	$Dd = \frac{1}{Dd} \times 1000$
Ct	Coefficiente de torrencialidade	$Ct = Dh \times Dd$

(Continuação)

ANÁLISE HIPSOMÉTRICA		Expressão designatória
Z_{max}	Altitude máxima (m)	-
Z_{min}	Altitude mínima (m)	-
\bar{Z}	Altitude média (m)	-
H	Altitude máxima do rio principal (m)	-
h	Altitude mínima do rio principal (m)	-
\bar{D}	Declive médio (°)	-
D_{max}	Declive máximo (°)	-
D_{min}	Declive mínimo (°)	-
D_m	Declive médio do leito (°)	$D_m = \frac{\Delta Z}{1000 L_{rp}}$ <p>ΔZ (h-h) em m e L_{rp} em Km</p>
C_m	Coefficiente de massividade	$C_m = \frac{\bar{Z}}{A}$
C_o	Coefficiente orográfico	$C_o = \bar{Z} \times C_m$

Tabela 41- Parâmetros utilizados na caracterização da hidrografia